I+i Investigación aplicada e innovación

Volumen 4, N.° 2
Segundo semestre, 2010
Lima, Perú

ISSN 1996-7551

Editorial 89

Análisis numérico sobre la alteración microestructural resultante del Ensayo Jominy ..... *César Nunura* 92

Estudio de EMI en la transmisión de energía entre inversor — motor ..... *José Lazarte* 103

Control robusto del torque de un motor síncrono de imán permanente ..... *Arturo Rojas* 115

Renio: Química, Metalurgia e Historia ..... *Fathi Habashi* 121

Desinfección electroquímica de agua utilizando electrodos de SnO_2- Sb/Ti ..... *Miguel Ponce* 129

Simulación del control predictivo de un motor utilizando Java Real Time ..... *Renatto Gonzáles* 135

La sociedad del conocimiento, competencias y la formación universitaria ..... *Marco Aurelio Zevallos Y Muñiz* 143

Mitigación del riesgo eléctrico por análisis de Arc Flash ..... *César Chilet* 155

Modelo del impacto de la transmisión multitrama en la calidad de servicio de telefonía IP ..... *Raymond Hansen/ Martín Soto* 161

TECSUP

Editor en Jefe:
Alberto Bejarano, *Tecsup*

Comité editorial:
Aurelio Arbildo, *Inducontrol*
Daniel Mendiburu, *Tecsup*
Elena Flores, *Cementos Pacasmayo*
Hernán Montes, *Tecsup*
Hubert Castillo , *Tal S.A.*
Jack Vainstein, *Vainstein Ingenieros*

Coordinadora:
Mayra Pinedo

Colaboradores:
Arturo Rojas
César Chilet
César Nunura
Fathi Habashi
José Lazarte
Marco Aurelio Zevallos Y Muñiz
Martín Soto
Miguel Ponce
Raymond Hansen
Renatto Gonzales

Corrector de estilo:
Juan Manuel Chávez

Diseño y diagramación:
OT Marketing Publicitario

Impresión:
Dayma Consorcio S.A.C.

Hecho el depósito legal en la Biblioteca Nacional del Perú: 2007-04706

Tecsup
Arequipa:
Urb. Monterrey Lote D-8 José Luis Bustamante y Rivero.
Arequipa, Perú

Lima:
Av. Cascanueces 2221 Santa Anita. Lima 43, Perú

Trujillo:
Vía de Evitamiento s/n Víctor Larco Herrera. Trujillo, Perú

Publicación semestral
Tecsup se reserva todos los derechos legales de reproducción del contenido; sin embargo autoriza la reproducción total o parcial para fines didácticos, siempre y cuando se cite la fuente.

Nota
Las ideas y opiniones contenidas en los artículos son responsabilidad de sus autores y no refleja necesariamente el pensamiento de nuestra institución.

EDITORIAL

El objetivo de la revista *I+i* es difundir la investigación aplicada e innovaciones, con la finalidad de contribuir al desarrollo de la ingeniería y tecnología.

Para alcanzar sus fines, la publicación cuenta con la activa colaboración de investigadores nacionales y extranjeros de instituciones de alto prestigio, que colaboran con el envío de sus trabajos para ser publicados. Asimismo, es relevante resaltar la participación de representantes de la empresa privada, que junto a destacados investigadores, conforman la cartera de árbitros que revisan los trabajos de manera doble y anónima.

Con este número culminamos el cuarto año de publicación de la revista *I+i*, lapso en el que hemos logrado formar parte del Catálogo de Latindex (Sistema de Información sobre las revistas de investigación científica, técnico-profesionales y de divulgación científica y cultural que se editan en los países de América Latina, el Caribe, España y Portugal), donde participan solamente aquellas revistas seleccionadas según criterios internacionales de calidad editorial. Así, nuestra publicación es considerada como una revista indexada con lectores y autores internacionales. Las revistas indexadas son publicaciones periódicas de investigación que denotan alta calidad y son listadas en alguna base de datos de consulta mundial.

En esta edición, correspondiente al segundo semestre de 2010, al igual que en las anteriores ediciones, contamos con aportes importantes de profesionales reconocidos en las áreas de Procesos Químicos y Metalúrgicos, Automatización y Control, Telefonía IP, Electrotecnia y Educación.

Es nuestro compromiso con los lectores mejorar constantemente el estándar de la revista, para que continúe sirviendo como vehículo de información interesante e importante para las empresas y sus profesionales, compartiendo resultados de investigaciones aplicadas.

Comité editorial

Análisis numérico sobre la alteración microestructural resultante del Ensayo Jominy

Numerical analysis on the resulting microstructural alteration of the Jominy End-Quench test

César Nunura, *Tecsup*

Resumen

En esta contribución se aborda una correlación numérica de los factores que pueden afectar la templabilidad de un acero SAE 1045 sometido al Ensayo Jominy a tres temperaturas de austenitización. Tal correlación fue hecha sobre la base del cálculo de las tasas de enfriamiento obtenidas a partir del análisis térmico del ensayo. Finalmente se obtuvieron expresiones numéricas que correlacionan el porcentaje de fases presentes en la microestructura y el perfil de durezas en función de la variación de la tasa de enfriamiento durante el ensayo.

Abstract

This contribution addresses a numerical correlation of the factors that may affect the hardenability of a SAE 1045 steel subjected to the Jominy end-quench test in three austenitizing temperatures. Such correlation was made by calculating the cooling rates obtained from the thermal analysis of the test. Finally numerical expressions were obtained that correlate the percentage of phases present in the microstructure and hardness profile depending on the variation of the cooling rate during the test.

Palabras clave

Ensayo Jominy, Tasa de Enfriamiento, Temperatura de Austenitización, Microestructura, Porcentaje de Fases, Microdureza.

Key words

Jominy end-quench test, Cooling Rate, Austenitizing temperature, Microstructure, Percent of phases, microhardness

INTRODUCCIÓN

En este trabajo, probetas de acero SAE 1045 fueron sometidas al tratamiento térmico de normalizado y posteriormente austenitizadas a tres temperaturas diferentes: 20, 70 y 120 grados por encima de la temperatura crítica Ac3, según el diagrama CCT (continuous cooling transformation) para el acero SAE 1045. Fueron colocados termopares en las probetas y en pontos predefinidos para poder obtener las curvas de enfriamiento durante la realización del Ensayo Jominy. La metalografía y el levantamiento del perfil de dureza Jominy (utilizando la escala HRC) permitieron evaluar la templabilidad del acero ensayado en función de la temperatura de austenitización. Los cálculos entre el porcentaje de fases presentes a partir de las microestructuras y ensayos de microdureza Vickers en las fases y microconstituyentes generaron valores de dureza que fueron comparados con los resultados de dureza HRC anteriormente citados. Posteriormente, se obtuvieron ecuaciones por métodos de regresión numérica. Estas ecuaciones consiguen estimar la cantidad de fases y microconstituyentes (martensita, bainita, perlita y ferrita) formados durante el ensayo. Asimismo, expresiones que describen el perfil de dureza. La Figura 1 muestra un esquema del Ensayo Jominy y del perfil de dureza esperado.

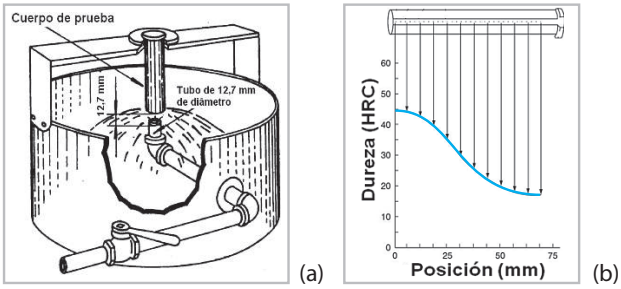


Figura 1. Ensayo Jominy. En (a) el dispositivo de ensayo. En (b) el perfil de dureza HRC en función de la extremidad enfriada.

FUNDAMENTOS

El Ensayo Jominy que obedece a la norma ASTM A 255 es utilizado para medir la templabilidad de los aceros. Se trata del calentamiento de una barra cilíndrica padronizada del material en cuestión (25,4 mm de diámetro y 100 mm de longitud) hasta la temperatura de austenitización y, en seguida, enfriada en una de sus extremidades, a través de un chorro de agua con temperatura y velocidad controladas con el propósito de inducir la formación de la estructura martensítica a partir de la extremidad enfriada. Luego, se mide la dureza a lo largo de la probeta a intervalos de 1,56 mm entre cada medida (en este trabajo fueron consideradas distancias de 1,6 mm). Evidentemente, las primeras medidas presentarán valores altos de dureza debido a la formación de la martensita por el rápido enfriamiento del agua. Consecuentemente, la dureza disminuirá en posiciones más distantes de la extremidad enfriada, pues en estos puntos las tasas de enfriamiento son menores, lo que origina la formación de fases como la ferrita y la perlita.

Algunas publicaciones han mostrado el interés de estudiar detalladamente este ensayo para poder comprender los fenómenos de transferencia de calor y transformación de la fase austenítica durante el enfriamiento [1], [2], [3]. Actualmente se desarrollan modelos numéricos para la simulación de las curvas de enfriamiento, previsión de la formación microestructural, análisis de las fases presentes y el perfil de dureza obtenido durante el ensayo [4], [5], [8].

METODOLOGÍA

Fueron utilizadas probetas de acero de la calidad SAE 1045 con las geometrías exigidas por la norma ASTM A 255. En la Tabla 1 se muestra el resultado del análisis de Espectrometria de Emisión Óptica (EEO) para la determinación de la composición química en porcentaje del acero en cuestión.

Tabla 1

Composición Química del Acero SAE 1045 (En Porcentaje)

C	Si	Mn	P	S	Cu
0,45	0,18	0,70	0,02	0,03	0,12
Cr	**Ni**	**V**	**Co**	**W**	**Mo**
0,05	0,05	<0,001	<0,01	<0,01	<0,005

El restante del porcentaje de elementos es el hierro (Fe).

Es importante conocer estos valores para poder calcular la temperatura crítica Ac3 y estipular las tres temperaturas de austenitización de ensayo. Utilizando una ecuación empírica de la literatura [6] en (1), se muestra el cálculo de Ac3:

$$A_{c3} = 910 - 203\sqrt{\%C} - 15.2Ni + 44.7Si + 104V + 31.5Mo + 13.1W \quad (1)$$

$$A_{c3} = 781°C$$

En función a Ac3, las temperaturas de austenitización fueron determinadas como: 800, 850 y 900 °C. Y de este modo, poder analizar como la temperatura de austenitización puede influenciar en la templabilidad del acero.

Las probetas fueron sometidas a tratamiento térmico de normalización conforme exige el ensayo de la ASTM A 255 por un periodo de 30 minutos para recristalizar y, a la vez, homogenizar posibles deformaciones en los granos de la estructura ferrítica-perlítica debido al proceso de fabricación. Dentro del horno se colocó una atmosfera rica en carbono para proteger las probetas de la descarburización. A seguir, fueron colocadas 6 termocuplas a distancias de 1,6 mm de separación a partir de la extremidad enfriada, con la intención de obtener las curvas de enfriamiento y posteriormente calcular las tasas de enfriamiento. Estos termopares fueron colocados en posiciones de la probeta donde probablemente ocurrirá transformación martensítica.

La Figura 2 muestra la disposición de las termocuplas en la probeta Jominy.

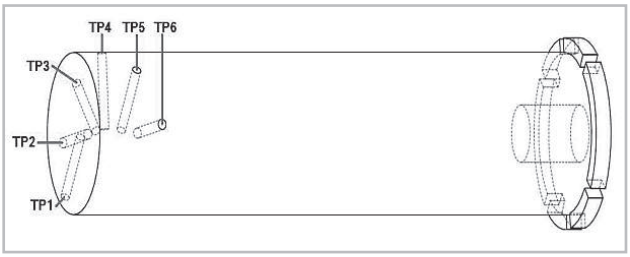


Figura 2. Disposición de las termocuplas en la probeta Jominy.

Las probetas fueron austenitizadas a las temperaturas anteriormente citadas por 30 minutos (tiempo de encharque). En esta ocasión se inyectó argón dentro de la cámara del horno (6 litros/minuto) como atmosfera protectora, y de esta manera proteger a la probeta de los efectos de la descarburización. Concluido este intervalo, la probeta es retirada del horno y colocada rápidamente en el dispositivo de enfriamiento Jominy. El chorro de agua que enfría la extremidad de la probeta debe permanecer accionado durante 600 s (Según ASTM A255). Las Figuras 3 y 4 muestran el esquema de montaje de la probeta en el horno y el enfriamiento de la misma.

Con el auxilio de un sistema de adquisición de datos fue posible colectar las temperaturas monitoreadas por las termocuplas en

cada instante del enfriamiento de la probeta. La Figura 5 muestra una curva de enfriamiento en una posición aleatoria durante el ensayo. La propuesta para calcular la tasa de enfriamiento sería: estimar el intervalo entre la temperatura de austenitización (representada por To Aust.) con la temperatura de inicio de transformación martensítica (Mi). Este ΔT es dividido por un intervalo de tiempo Δt, en que la velocidad de enfriamiento es máxima. En (2) se muestra el cálculo de la tasa de enfriamiento.

$$\overset{0}{T} = \frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{(T^0 Aust.) - (T^0 Mi)}{\Delta t} \qquad (2)$$

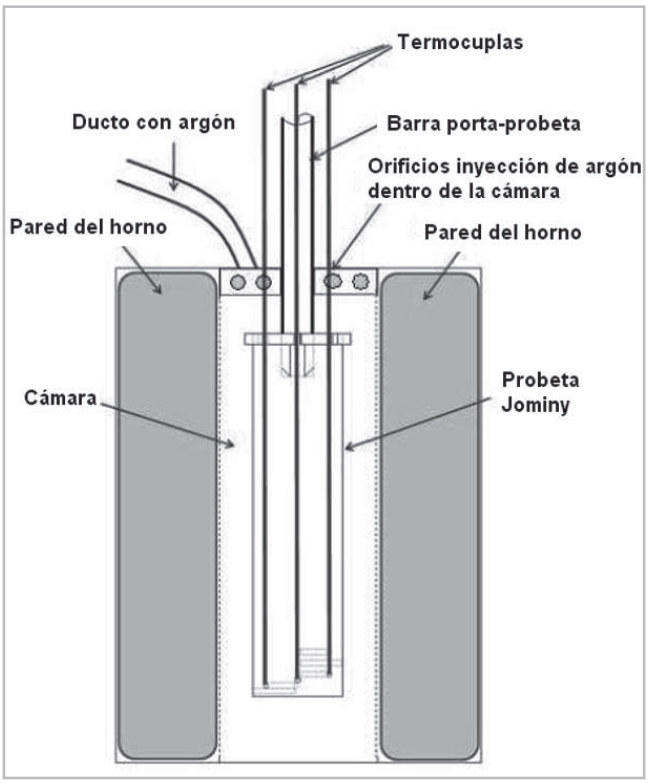


Figura 3. Esquema de montaje de la probeta en el horno.

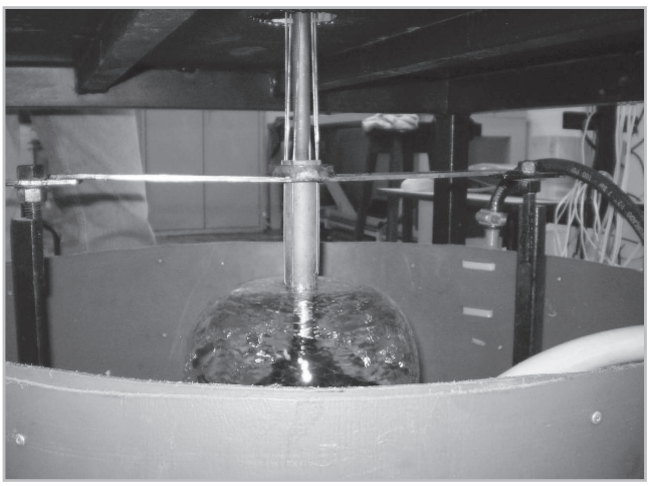


Figura 4. Enfriamiento de la probeta.

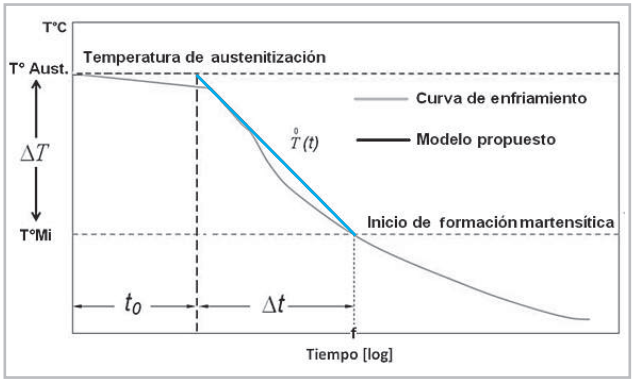


Figura 5. Metodología aplicada para el cálculo de la tasa de enfriamiento.

Conforme a lo explicado en la norma ASTM 255 y en la Fig. 1(b) se realizaron en la probeta indentaciones en la escala HRC para la obtención del perfil de dureza Jominy, en observancia de la norma ASTM E82-03. Asimismo se efectuaron posteriormente ensayos de microdureza Vickers en las fases presentes de la microestructura, con cargas variantes de 300, 200 y 25 g. con un tiempo de aplicación de 15 segundos. La Figura 6 muestra una microdureza aplicada en una estructura ferrítica - perlítica.

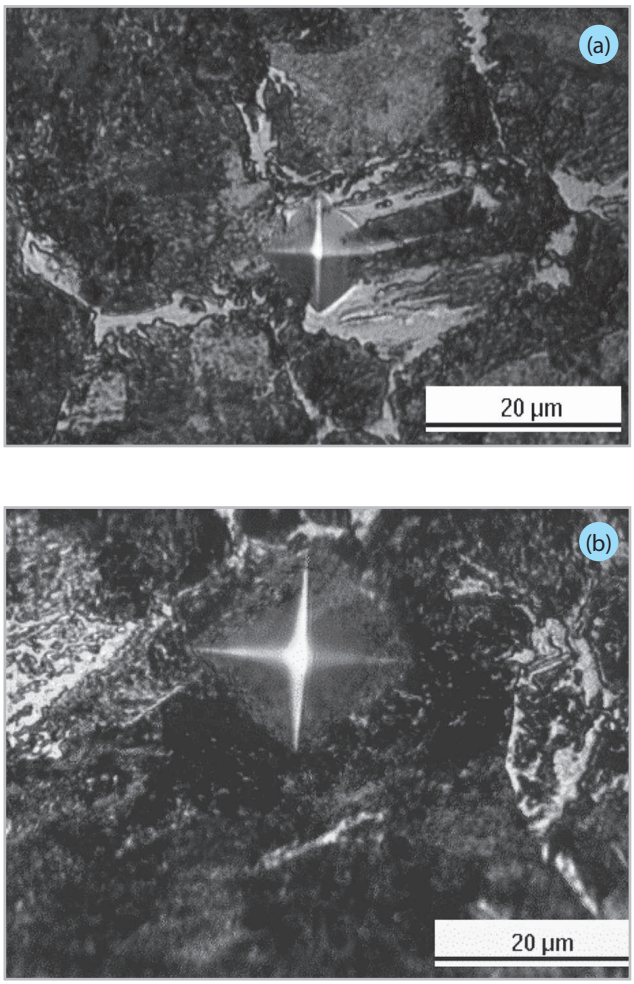


Figura 6. Indentaciones efectuadas en las fases o microconstituyentes.
En (a), indentación en una región ferrítica.
En (b), indentación en una región perlítica.

Se utilizaron las micrografías resultantes del ensayo en las posiciones donde se colocaron los termopares para estimar el porcentaje de fases que se formaron durante el enfriamiento, con el auxilio de un software metalográfico (Omnimet). Tal herramienta computacional nos permite estimar la fracción de las fases presentes en una micrografía, con el auxilio de rutinas programadas en el software y que cuantifican el área de los mosaicos metalográficos en función del color y morfología. Fue utilizado como ataque químico metalográfico Nital con concentración de 3%. La secuencia de este cálculo es mostrada en la Figura 7.

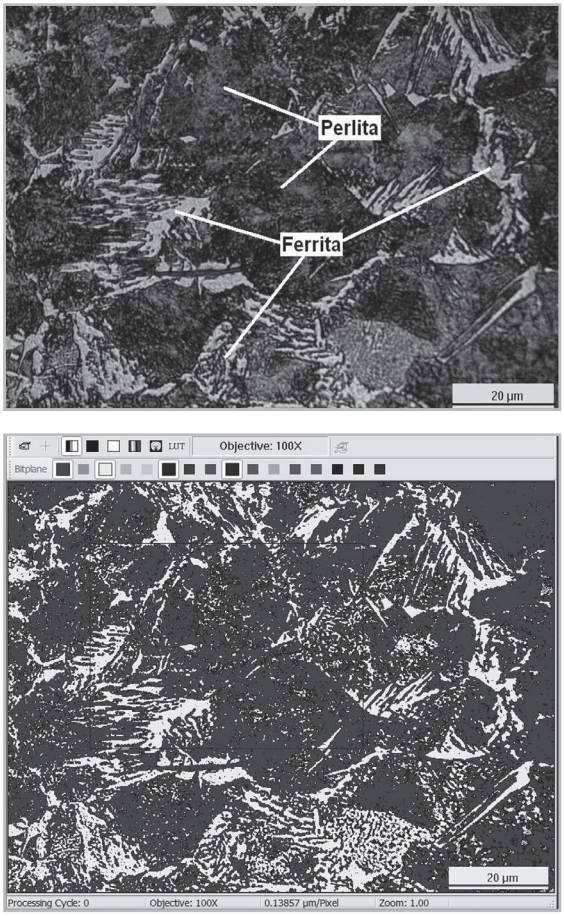


Figura 7. Cálculo del porcentaje de fases de una determinada microestructura en la probeta. En (a), la metalografía. En (b), tratamiento de la imagen. En (c), la cuantificación del porcentual de fases presentes de la microestructura.

Si se conocen las microdurezas de las fases presentes y el porcentual de las mismas, puede ser aplicada en (3) la siguiente ecuación (Regla de las Fases) para el cálculo de la dureza global (HV) en cada punto del cuerpo de prueba [3] para fines comparativos con los resultados de dureza (HRC).

$$HV = [(\%Martensita)\cdot HV(Martensita)] + [(\%Bainita)\cdot HV(Bainita)] + [(\%Perlita)\cdot HV(Perlita)] + [(\%Ferrita)\cdot HV(Ferrita)] \quad (3)$$

RESULTADOS

A. Tasas de enfriamiento experimentales

Siguiendo la metodología descrita en la ecuación (2) fueron calculadas las tasas de enfriamiento para cada posición de termocupla conforme fue explicado en la Figura 2 y en cada temperatura de austenitización conforme la Tabla 2. La Figura 8 muestra el cálculo de las tasas de enfriamiento para la probeta que fue austenitizada a 800 °C. La misma metodología fue empleada para las temperaturas de 850 y 900 °C respectivamente.

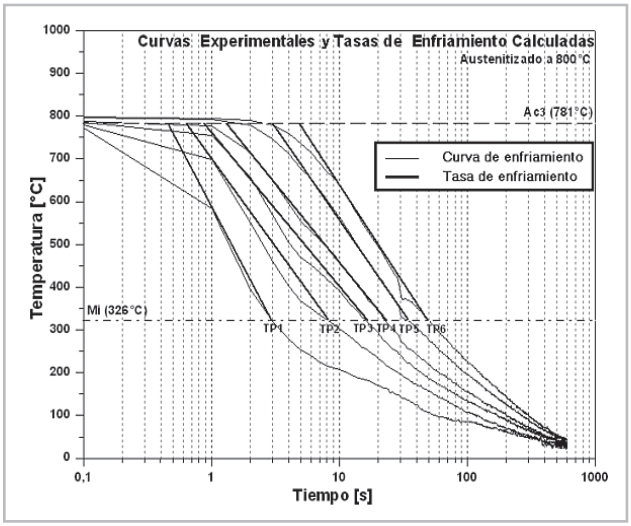


Figura 8. Cálculo de las tasas de enfriamiento a partir de las curvas de enfriamiento obtenidas a través de termocuplas en la probeta Jominy.

Fueron ajustados numéricamente los puntos de las tasas en función de la posición, conforme a la Figura 9, en las tres temperaturas de austenitización (800, 850 y 900 °C) aplicadas al ensayo, generando expresiones numéricas (4, 5 y 6) las cuales son descritas de la siguiente forma:

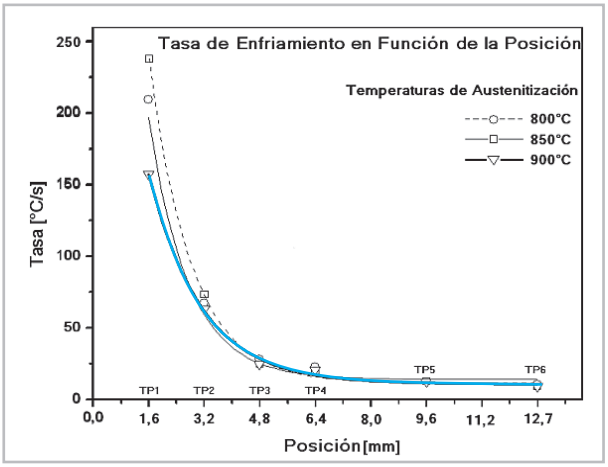


Figura 9. Ajuste numérico de las tasas de enfriamiento.

$$\overset{0}{T} = 844{,}7 \cdot \exp\left(\frac{-posición}{1{,}21}\right) + 11{,}7 \quad (4)$$

$$\overset{0}{T} = 739{,}8 \cdot \exp\left(\frac{-posición}{1{,}14}\right) + 13{,}9 \quad (5)$$

$$\overset{0}{T} = 423{,}2 \cdot \exp\left(\frac{-posición}{1{,}51}\right) + 10{,}6 \quad (6)$$

Tabla 2

Tasas de enfriamiento en función de la posición

Posición (mm)	Tasa (°C/s)		
1,6 – TP1	238	201	158
3,2 – TP2	73	56	63
4,8 – TP3	25	28	24
6,4 – TP4	20	23	21
9,6 – TP5	13	13	12
12,7 – TP6	10	9	9
T° Aust.	800	850	900

T° Aust.: temperatura de austenitización

B. Dureza global en función de la temperatura de austenitización

La Tabla 3 muestra las medidas del ensayo para el levantamiento del perfil de dureza Jominy a partir de los ensayos de dureza HRC para las tres temperaturas de austenitización (promedio de 4 durezas) el cual es mostrado en la Figura 10. Los valores entre paréntesis indican que la dureza se encuentra fuera de la escala HRC en esa posición.

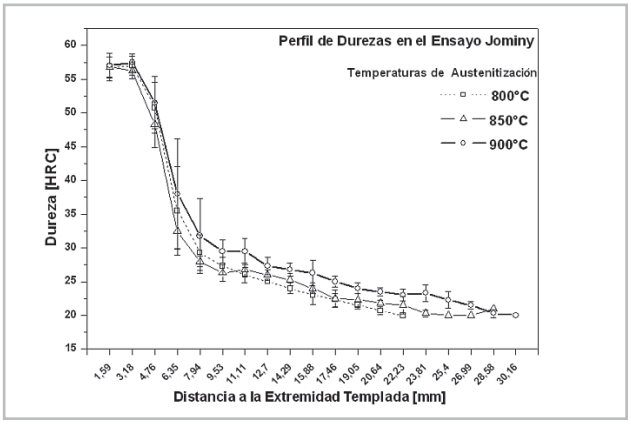


Figura 10. Perfil de durezas del Ensayo Jominy.

Tabla 3

Medidas de dureza para diferentes temperaturas de austenitización (Promedio de 4 durezas).

DET	Temperatura de austenitización					
(mm)	800°C	DE	850°C	DE	900°C	DE
1,6	57	2,1	57	1,5	57	1,8
3,2	57	1,4	56	1,3	58	1,3
4,8	51	3,8	48	3,4	52	3,9
6,4	36	6,6	33	2,6	38	8,2
7,9	29	2,6	28	0,8	32	5,6
9,6	27	1,3	26	1,3	30	1,7
11,1	26	1,2	27	1,0	30	1,9
12,7	25	0,0	26	0,8	27	1,3
22,2	20	0,0	22	1,3	23	0,8
23,8	(19)	-	20	0,5	23	1,3
25,4	(18)	-	20	0,0	22	1,3
27,0	(17)	-	20	0,0	21	0,6
28,6	(17)	-	20	0,0	20	0,6
30,2	(16)	-	(18)	-	20	0,0

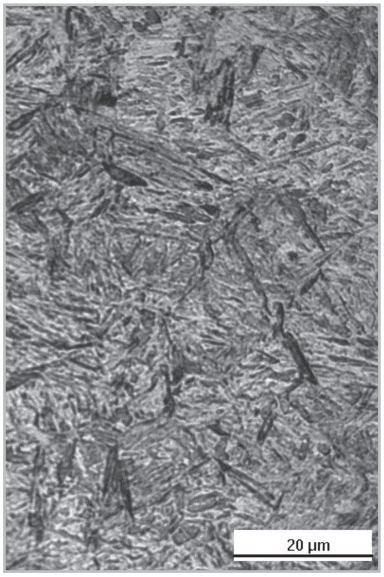
DET: Distancia a la extremidad templada
DE: Desviación estándar

Se observa que hubo un aumento de templabilidad con una mayor temperatura de austenitización.

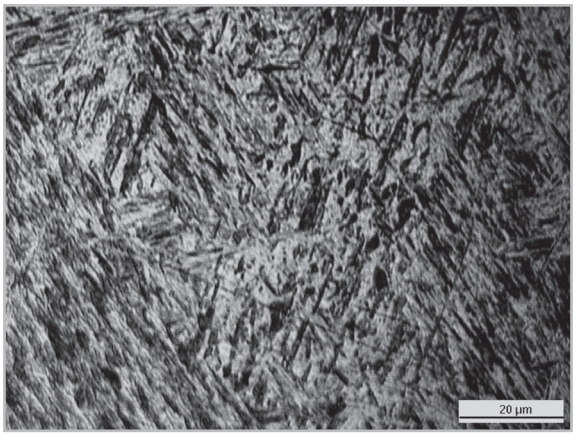
C. Análisis metalográfica

La Figura 11 muestra las metalografías levantadas a 1,6 mm de distancia de la extremidad enfriada de la probeta austenitizada a 800, 850 y 900 °C respectivamente. En (a) y en (b) esta martensita se formó a una austenitización de 800 y 850 °C respectivamente. En (c), una martensita con morfología más prominente probablemente del aumento del grano austenítico previo a temperaturas de 900 °C. Se observa que a mayor temperatura de austenitización, la martensita formada en este punto adopta una morfología grosera.

(a)



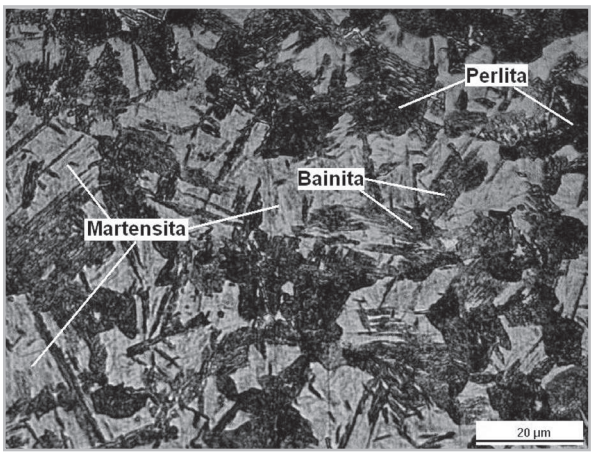
(b)



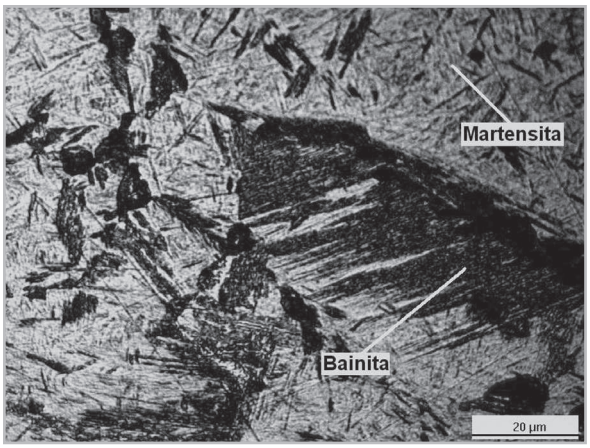
(c)

Figura 11. Estructuras martensíticas. En (a) y en (b) esta martensita se formó proveniente de una austenitización de 800 y 850 °C respectivamente. En (c), una martensita con morfología más prominente probablemente del aumento del grano austenítico previo a temperaturas de 900 °C. Ataque: Nital.

La Figura 12 muestra las metalografías levantadas a 4,8 mm de distancia de la extremidad enfriada de la probeta austenitizada a 800 y 900 °C respectivamente. Se observa que a medida que la temperatura de austenitización aumenta, la cantidad de formación de la estructura bainítica (áreas oscuras en formato de agujas) aumenta seguida de la formación de martensita (regiones claras). En (a), formación de bainita con algunas probables colonias de perlita fina. En (b), la formación de bainita aumenta con la temperatura de austenitización.



(a)



(b)

Figura 12. Microestructuras mixtas a 4,8 mm de la extremidad enfriada durante el ensayo. Ataque: Nital.

La Figura 13 muestra las metalografías levantadas a 12,7 mm de distancia de la extremidad enfriada de la probeta austenitizada a 800 y 900 °C. Se observa la formación de ferrita y perlita. A medida que la temperatura de austenitización aumenta, la formación de ferrita libre (áreas blancas) adopta una morfología acicular o en forma de agujas (Figura 13b) que penetra las colonias de perlita. Según [7], esta textura acicular de la ferrita generalmente está asociada a un aumento del tamaño de grano (probablemente a aumento de la temperatura de austenitización), y los materiales que la poseen son menos tenaces, debido a un aumento en la dureza.

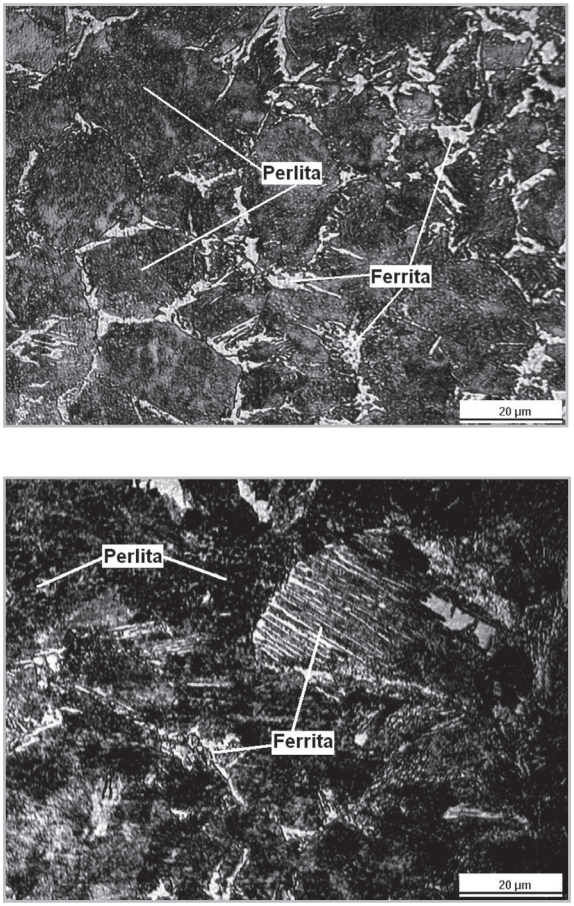


Figura 13. Microestructuras ferríticas - perlíticas. Ataque: Nital.

D. Cálculo de las fracciones de fases y microconstituyentes presentes

La Figura 14 muestra la cantidad de fases y microconstituyentes que se formaron en función de las tasas de enfriamiento durante el ensayo para cada temperatura de austenitización.

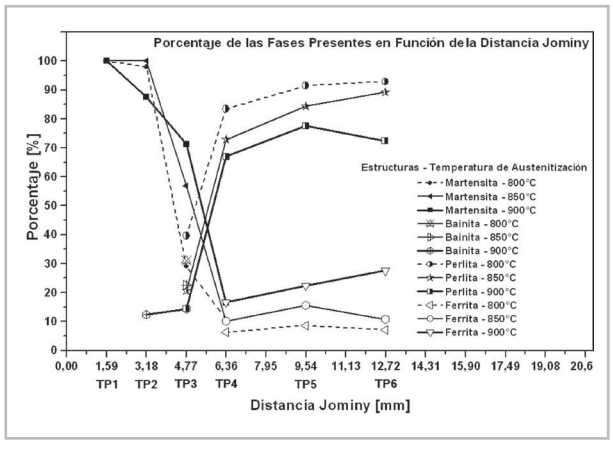


Figura 14. Porcentaje de las fases y microconstituyentes presentes en función de la extremidad enfriada en las posiciones de las termocuplas y de la temperatura de austenitización.

E. Análisis de microdureza en las fases y microconstituyentes.

Conforme fue mencionado en la Sección IID fueron realizados ensayos de microdureza Vickers en las fases y microconstituyentes. La Figura 15 muestra valores de microdureza para cada temperatura de austenitización. Un aspecto importante de resaltar son los valores de dureza encontrados para la ferrita (255 a 322 HV), cuando el valor teórico es de 90 HB que equivale a 90 HV. Esto puede ser explicado debido a que este valor se refiere al hierro puro. El SAE 104,5 utilizado en el Ensayo Jominy contiene otros elementos químicos que pueden afectar la dureza.

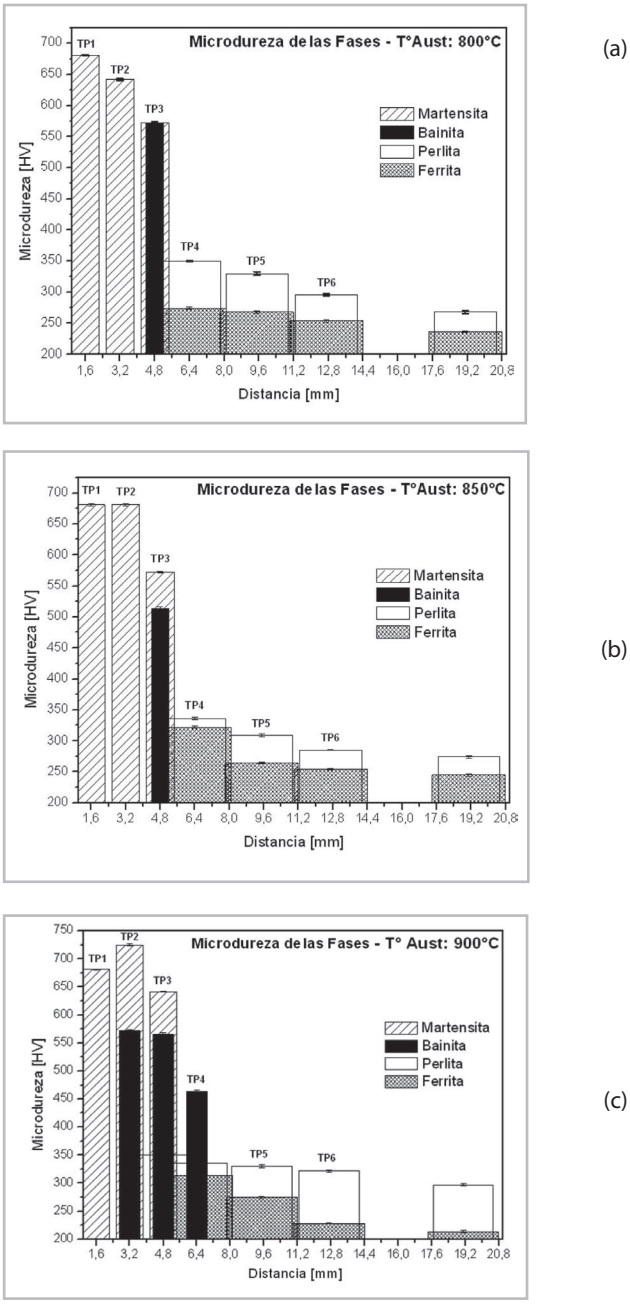


Figura 15. Microdureza Vickers en las fases y microconstituyentes presentes.

F. Cálculo de la dureza HRC en base a la microdureza y porcentaje de fases y microconstituyentes.

En la Ecuación (3) son aplicados los resultados de las microdurezas y porcentajes de fases, obteniéndose valores de dureza que son comparados con los obtenidos experimentalmente. La Tabla 4 muestra esta comparación.

Tabla 4

Comparación entre durezas medidas y calculadas

DET	Durezas HRC en función de la temperatura de austenitización					
	800 °C		850 °C		900 °C	
(mm)	M	C	M	C	M	C
1,6 – TP1	57	59	57	59	57	59
3,2 – TP2	57	57	56	59	58	60
4,8 – TP3	51	51	48	52	52	55
6,4 – TP4	36	35	33	35	38	36
9,6 – TP5	27	33	26	31	30	33
12,7 – TP6	25	29	26	28	27	29

DET: Distancia a la extremidad templada
M: Valor medido en el durómetro
C: Valor calculado por la Regla de las Fases (Ecuación 3)

G. Correlación entre la dureza y la tasa de enfriamiento

Tal correlación puede ser establecida a partir de los datos de las Tablas 2 y 3 con lo que se obtienen expresiones numéricas (7), (8) y (9) para el cálculo aproximado de la dureza en función de la tasa de enfriamiento, temperatura de austenitización y posición conforme la Tabla V y la Figura 16.

$$HRC = -64{,}5 \cdot \exp\left[\frac{-\overset{o}{T}}{15{,}2}\right] + 57{,}5 \qquad (7)$$

$$HRC = -51{,}6 \cdot \exp\left[\frac{-\overset{o}{T}}{23{,}2}\right] + 58{,}4 \qquad (8)$$

$$HRC = -58{,}2 \cdot \exp\left[\frac{-\overset{o}{T}}{15{,}5}\right] + 57{,}6 \qquad (9)$$

Tabla 5

Relación tasa de enfriamiento y dureza

DET	Temperatura de austenitización					
	800 °C		850 °C		900 °C	
(mm)	T	D	T	D	T	D
1,6 – TP1	238	57	201	57	158	57
3,2 – TP2	73	57	56	56	63	58
4,8 – TP3	25	51	28	48	24	52
6,4 – TP4	20	36	23	33	21	38
9,6 – TP5	13	27	13	26	12	30
12,7 – TP6	10	25	9	26	9	27

DET: Distancia a la extremidad templada
T: Tasa de enfriamiento (°C/s)
D: Dureza (HRC)

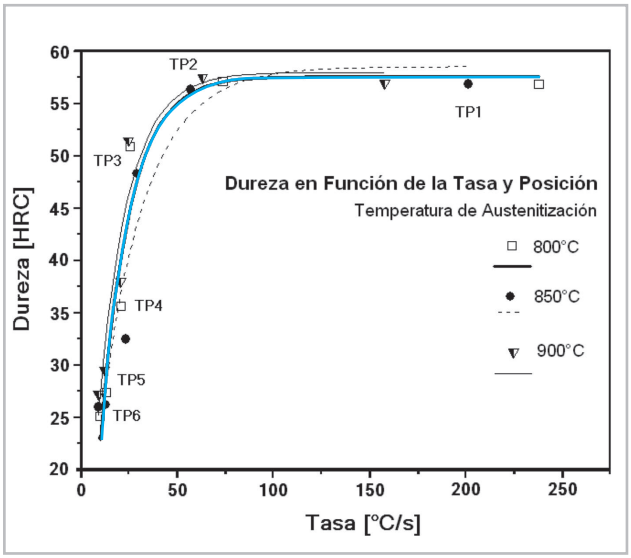
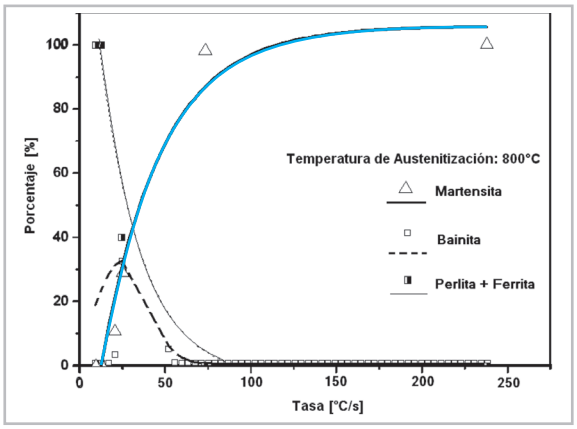


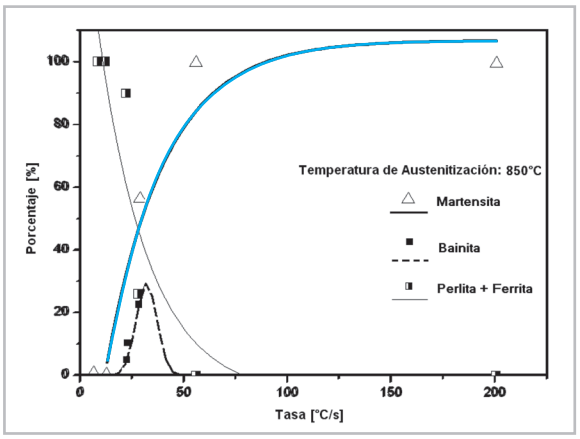
Figura 16 Correlación entre dureza y tasa de enfriamiento en función de la posición en la probeta.

H. Correlación entre el porcentaje de fases y tasa de enfriamiento

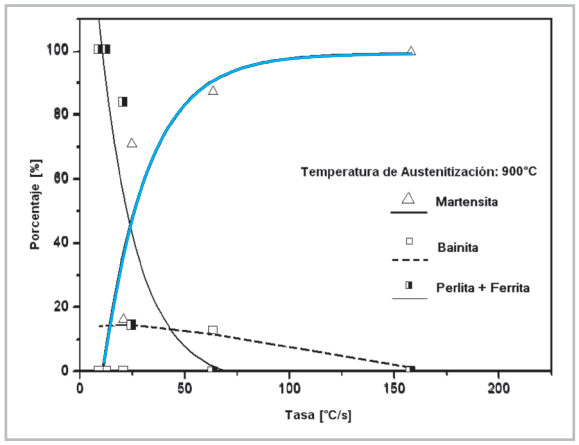
Con los datos porcentuales de fases y microconstituyentes presentes en la microestructura de la probeta y las tasas de enfriamiento, fueron obtenidas expresiones numéricas (10), (11), (12), (13), (14), (15), (16), (17) y (18), las cuales describen la presencia de una determinada fase en la microestructura a medida que la tasa de enfriamiento varia, conforme es mostrado en las Figuras 17, 18 y 19.



(a)



(b)



(c)

Figura 17. Porcentaje de fases presentes en función de la tasa de enfriamiento y temperatura de austenitización. En (a), 800 °C. En (b), 850 °C. En (c), 900 °C.

Para una temperatura de austenitización de 800 °C:

$$\%Martensita = -149{,}6 \cdot \exp\left[\frac{-\overset{o}{T}}{35{,}2}\right] + 105{,}7 \quad (10)$$

$$\%Bainita = 0{,}51 + 32{,}2 \cdot \exp\left[\frac{-(\overset{o}{T} - 24{,}9)^2}{432{,}2}\right] \quad (11)$$

$$\%Perlita + Ferrita = 164{,}8 \cdot \exp\left[\frac{-\overset{o}{T}}{24{,}8}\right] - 4{,}1 \quad (12)$$

Para una temperatura de austenitización de 850 °C:

$$\%Martensita = -160{,}9 \cdot \exp\left[\frac{-\overset{o}{T}}{28{,}3}\right] + 106{,}9 \quad (13)$$

$$\%Bainita = 3{,}8 \cdot \exp\left[-2\left(\frac{\overset{o}{T} - 32{,}1}{10{,}1}\right)^2\right] \quad (14)$$

$$\%Perlita + Ferrita = 168{,}4 \cdot \exp\left[\frac{-\overset{o}{T}}{24{,}6}\right] - 6{,}6 \quad (15)$$

Para una temperatura de austenitización de 900 °C:

$$\%Martensita = -161{,}9 \cdot \exp\left[\frac{-\overset{o}{T}}{21{,}5}\right] + 99{,}4 \quad (16)$$

$$\%Bainita = 14{,}4 \cdot \exp\left[-\left(\frac{\overset{o}{T} - 24{,}5}{432{,}2}\right)^2\right] \quad (17)$$

$$\%Perlita + Ferrita = 186{,}9 \cdot \exp\left[\frac{-\overset{o}{T}}{17{,}9}\right] - 3{,}7 \quad (18)$$

CONCLUSIONES

Se observó que la morfología de las fases obtenidas se alteran en función de la temperatura de austenitización. Para una temperatura de 900 °C hubo un incremento en el perfil de durezas. Asimismo, las tasas de enfriamiento concordaron de un modo exponencial decreciente con el porcentual de fases y con los valores de dureza medidos dentro del intervalo analizado por las termocuplas. Finalmente, las expresiones numéricas obtenidas permiten observar el comportamiento de la microestructura a medida que la tasa de enfriamiento varía durante el ensayo.

REFERENCIAS

Revistas:

[1] HOMBERG, D. A. "Numerical Simulation of the Jominy End-Quench Test". *Acta Material.* Volume 44, pp. 4375 – 4385. 1996.

[2] LE MASSON, P; LOULOU, T; ROGEON, P., CARRON, D. y QUEMENER, J. "A numerical study for the estimation of a convection heat transfer coefficient during a metallurgical Jominy end-quench test". *International Journal of Thermal Sciences.* Vol 41, 2002, pp. 517 – 527.

[3] SMOLJAN, B. "Mathematical modeling of austenite during the quenching". 13th International Scientific Conference. *Achievements in Mechanical and Materials Engineering*. Poland, 2005.

[4] SMOLJAN B; ILJIC S; HANZA S. y TRAVEN F. "An analysis of modified Jominy-test". *Computacional Materials Science and Surface Engineering*. Volume 1, 2009, pp. 120 – 124.

[5] ZEHTAB, A; SAJJADI, S; ZEBARJAD, S; NEZHAD S. "Prediction of hardness at different points of Jominy specimen using quench factor analysis method". *Journal of Materials Processing Technology*. Volume 99, 2008, pp. 124 – 129.

Libros:

[6] Asm Handbook. *Heat Treatment*. ASM, Vol.4, 1985.

[7] COLPAERT, H. *Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns*. 4ª Edição. Revisão Técnica: André da Costa e Silva. Editora Blucher. São Paulo. Brasil, 2008.

ACERCA DEL AUTOR

César Nunura es graduado en ingeniería mecánica por la Pontificia Universidad Católica do Rio Grande do Sul del Brasil (PUCRS), y en dicho país recibió el Título de Máster en Ingeniería de Minas, Metalurgia y Materiales por la Universidad Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Su experiencia profesional incluye trabajos de Investigación en el Centro de Tecnología de la UFRGS y en el Grupo de Investigación denominado Núcleo de Materiales Metálicos – NUCLEMAT de la PUCRS. En el ámbito de industria ejerció el oficio de ingeniero como metalurgista. Actualmente es docente del departamento de Maquinara de Planta de TECSUP – Lima.

Agradecimientos

El autor agradece la colaboración del Dr. Jaime A. Spim de la UFRGS del Brasil y del Dr. Carlos Alexandre dos Santos de la PUCRS del Brasil por el apoyo brindado a esta contribución, así como al Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico CNPq del Brasil. Agradecimiento especial al Ing. Mg. Javier Ganoza del Departamento de Maquinaria de Planta por el incentivo a la investigación.

Original recibido: 18 de octubre de 2010
Aceptado para publicación: 29 de octubre de 2010

Estudio de EMI en la transmisión de energía entre inversor - motor

Study of EMI in the transfer of energy between inverter - motor

José Lazarte , *Tecsup*

Resumen

Este artículo trata del estudio realizado sobre EMI (Interferencia Electromagnética) en la transferencia de energía entre la etapa del inversor de un Drive (variador de velocidad o variador de frecuencia) y un motor de inducción asíncrono, usando para este propósito sondas de detección de campo Eléctrico y Campo Magnético, Modelos HZ-551 y HZ-552.

Haremos uso de la transformada rápida de Fourier (FFT) como herramienta matemática que nos permita visualizar el espectro de frecuencia de las señales detectadas irradiadas desde el medio de transmisión de energía. Para poder realizar la captura de los espectros de amplitud resultantes de la FFT usaremos un osciloscopio de Marca LeCroy Modelo WaveRunner 6000A. Este es un equipo para mediciones eléctricas, de control y uso en laboratorio que cumple con los requerimientos de EMC (Compatibilidad electromagnética) en concordancia con la Directiva 89/336/EEC para compatibilidad electromagnética y 73/23/EEC para bajo voltaje [4].

Abstract

This article is about the Study of EMI (*Electromagnetic Interference*) in the transfer of energy between the stage of the inverter of a Drive (Speed Driver) and an asynchronous engine of induction, using for this purpose a device of detection of Electrical field and Magnetic Field, Models HZ-551 and HZ-552.

We will use the Fast Fourier Transformed (FFT) as mathematical tool that allows us to visualize the spectrum of frequency of radiation detected from the media of transmission of energy. To be able to realize the capture of the resultant spectra of magnitude of the FFT we'll use a Lecroy oscilloscope, Model Wave Runner 6000A. This is an equipment for electrical measurements, control measurements and is used in the laboratory; which is according with EMC's requirements (Electro Magnetic Compatibility) in conformity to the Directive 89/336/EEC for electromagnetic compatibility and 73/23/EEC for low voltage [4].

Palabras clave

Interferencia Electromagnética, Campo eléctrico, Campo Magnético, Transformada rápida de Fourier, Espectro de Frecuencia.

Key words

EMI (Electromagnetic Interference), Electric Field, Magnetic Field, Fast Fourier Transform (FFT), Frequency Spectrum.

INTRODUCCIÓN

A manera de introducción al tema podemos detallar la importancia de entender que en el proceso de transmitir energía a través de un medio de transmisión, es importante tener en cuenta el fenómeno de emisión de ondas electromagnéticas. Esta es motivada por el medio mismo de transmisión: en qué forma esa energía es transmitida (señal eléctrica, sus características de amplitud, frecuencia y forma), quien recibe la energía y los fenómenos que se dan al no realizarse esta transmisión de manera ideal (sin perdida de ningún tipo).

Para evidenciar la presencia de la energía radiada en forma de onda electromagnética nos basaremos en los conceptos de Fourier y de los algoritmos de la transformada rápida. Aplicados mediante el uso de equipos que medición de señales eléctricas que tienen implementados estas herramientas matemáticas [4].

I. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA BAJO ESTUDIO.

El sistema en el que realizaremos este estudio está compuesto de tres partes: la fuente que emite la señal o energía, el medio por el que la señal se transmite y el receptor propuesto de la señal emitida.

De estas tres partes, la que corresponde al medio de transmisión (el cable usado es 4X16AWG de 1,32 m) es en la que prestaremos más atención.

Nuestro sistema en cuestión corresponde a la parte final de una cadena de automatización, es decir, a la correspondiente entre el motor y el drive que le suministra la energía de manera controlada.

Este binomio Drive–Motor presenta muchas connotaciones relativas al ahorro de energía, así como a la calidad de esta en un ambiente netamente industrial.

Iniciaremos la descripción por la fuente de señal a transmitir. En el control de la velocidad y la posición del eje de un motor se usan actualmente equipos electrónicos que realizan una transformación de energía basada en señales que son el resultado de procesos de conmutación de interruptores de estado sólido, desarrollados básicamente con IGBTs (Transistor Bipolar de Compuerta Aislada). Estos entregan señales que no son necesariamente senoidales puras, motivo por el cual dichas señales al ser transmitidas por un medio que no presenta una adecuada adaptación para ellas, acarrea diferentes tipos de problemas que caen dentro de lo que se denomina EMI (Interferencia Electromagnética).

Las características de la forma, amplitudes y frecuencias de las señales emitidas dependen del tipo de control que se esté desarrollando en el Drive, en función a cual es la dinámica requerida para el motor en la aplicación. En este punto podemos mencionar tres estrategias de control a seguir: el denominado control V/F, el control Vectorial y el vectorial sin sensor.

Para los tres tipos, la forma de señal base es una onda cuadrada modulada en anchura de pulso (PWM) con diferentes variantes en función a la sofisticación que cada fabricante le añada al modelo de equipo propuesto. En este proceso de modulación intervienen dos señales, denominadas: moduladora y portadora.

De estas señales la segunda es una señal de frecuencia que puede variar de 1 kHz a 10 kHz, manteniéndose en la mayoría de los casos entre 2 kHz y 4 kHz. La señal moduladora, en cambio, tiene un ámbito de variación de cero a la nominal del motor (es común una frecuencia nominal para motores asíncronos de 50 ó 60 Hz).

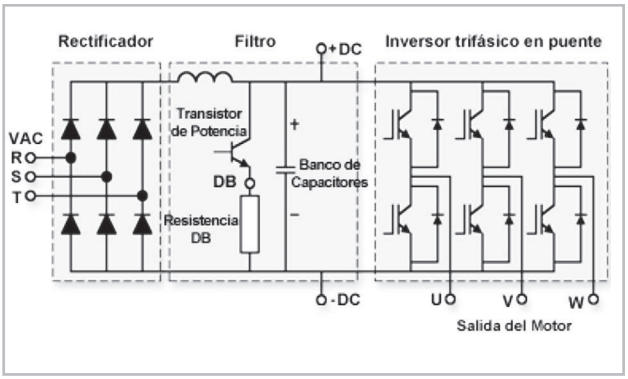


Figura 1. Etapa de potencia de un Drive.

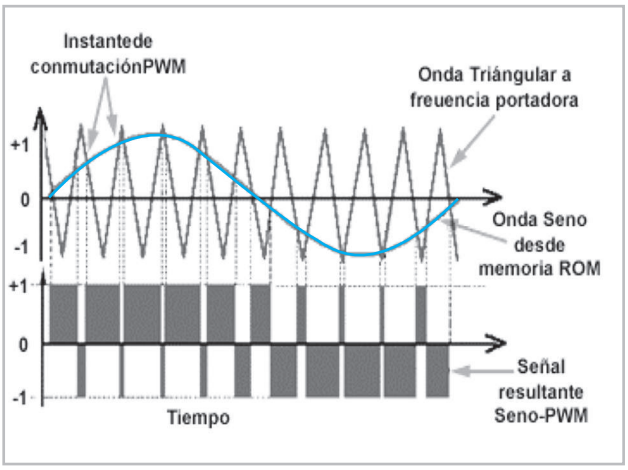


Figura 2. Señal PWM modulada.

Apoyándonos en Fourier, podemos realizar un estudio de las componentes armónicas contenidas en este tipo de señal, pues al no ser senoidales puras y tener periodo definido, nos permite cuantificar a las componentes armónicas de frecuencias múltiplos de la fundamental contenidas.

Figura 3. Jean-Baptiste Fourier

Es ahí donde se inicia la importancia del estudio propuesto, debido a que por el mismo medio de transmisión se enviarán señales de baja y alta frecuencia.

Situación que no se había dado con tanta cotidianidad en tiempos anteriores al de los Drives o variadores de velocidad. Por ello, la mayoría de las instalaciones eléctricas que soportan a este binomio no siempre están preparadas para esta situación, condición que acarrea una serie de problemas de carácter tecnológico que de muy buena forma se han atacado usando los valiosos conceptos de Calidad de Energía pero que en muchas ocasiones van más allá de los alcances que podemos tener con equipos de medición estándares.

Con esta idea en mente pasamos a describir el segundo componente de este sistema, el cual es el medio a traves del cual la energía contenida en la señal a transmitir se transportará hasta el equipo que la usará (en nuestro caso el motor). Con respecto al medio (el cable usado es 4X16AWG de 1.32 m), podemos decir que en principio está compuesto por el cableado y toda la a paramenta que interviene para realizar una conexión segura entre el Drive y el motor.

Muchas veces realizamos las conexiones pensando intuitivamente que la señal que pasara por dichos cables es senoidal de baja frecuencia. Situación que, como hemos comentado, no es ya una realidad.

Sabemos que en los cables se encuentran las tres propiedades básicas desde el punto de vista eléctrico de toda substancia: resistiva, inductiva y capacitiva. En nuestro caso las que predominarán, y en las que basaremos nuestro estudio son las resistivas y las capacitivas.

Un aspecto importante es también el comportamiento inherente a todo cable, a ser en determinado momento un elemento radiante a través del cual las señales pasan de ser corrientes y voltajes circulantes por el conductor a ser ondas electromagnéticas que se desplazan por el aire, así como campos eléctricos en áreas espaciales próximas a los conductores. [2]

Este comportamiento, por lo general, no es entendido en su real importancia. El valor de 150 kHz es usualmente tomado como límite entre lo que se denomina interferencia radiada e interferencia conducida. Ello no descarta el hecho de que se dé también a frecuencias menores a los 150kHz; punto a tener en cuenta en nuestro estudio [3].

Finalmente el tercer elemento es el motor, en el que sí predominan las características resistiva e inductiva. En nuestro caso usaremos un motor de inducción del tipo asíncrono (modelo M-6, fabricado por Elettronica Veneta & IN.EL. S.p.A) para el cual buscaremos identificar de forma dinámica los valores que lo caracterizan en función de su modelo matemático. Debemos de tener en cuenta que el diseño de estas maquinas parte de considerar que serán energizados mediante una señal senoidal de amplitud y frecuencia igual a los de su placa de alimentación. Situación que no se ha de cumplir necesariamente si es accionado mediante un Drive. El valor de las componentes resistivas e inductivas que lo caracterizaran generarán una buena o mala adaptación de impedancias, que traerá problemas en la absorción de la energía transmitida. Se pueden mencionar por ejemplo el fenómeno de onda reflejada el cual trae como consecuencia el envejecimiento prematuro del motor.

II. MODELADO DEL MEDIO DE TRANSMISIÓN

Esta parte es una de las más complejas en los estudios realizados de este tipo debido a que el realizar un modelamiento de los patrones de radiación en un ambiente industrial escapará en la mayoría de los casos a los alcances del uso de herramientas matemáticas, que tornarían muy complejo su manejo.

Figura 4: Imagen del Drive usado como fuente de energía (modelo MM440).

En nuestro caso nos limitaremos a aproximar un modelo del medio de transporte y del equipo que recibirá la energía. Usaremos para ello un Drive, con la posibilidad de realizar un procedimiento de reconocimiento de parámetros de medio de transporte y elemento final (cable de conexión y motor) el Micromaster MM440 [1], el cual es un equipo que tiene la posibilidad de desarrollar estrategias de control para el motor de los tres tipos mencionados anteriormente.

Este equipo nos permitirá realizar la toma de valores para el modelo matemático del motor, en base al procedimiento de parametrización básica del motor en el Drive y a la ejecución

de la rutina de reconocimiento de parámetros del motor, así como de la medición de la curva de magnetización. Mediante este procedimiento identificaremos los valores de los componentes resistivos del cable de conexión Drive-motor y resistivos e inductivos del motor.

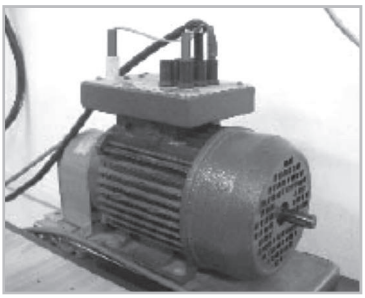


Figura 5. Imagen del motor

Procedimiento de Parametrización del variador [1]. Los parámetros a considerar son los que representan las características de placa del motor.

P0304	Tensión nominal del motor (V)	220
P305	Intensidad nominal del motor (A)	1,9
P307	Potencia nominal del motor (kW)	0,3
P0310	Frecuencia Nominal del motor (Hz)	60
P0311	Velocidad del motor	1730

Tabla 1. Parámetros de adaptación Drive - motor

Luego de ello realizamos el procedimiento de reconocimiento mediante los siguientes parámetros:

P1910 = 1

Le damos la orden de marcha luego de la alarma A0541 y esperamos que el Drive pase el estado de Busy.

P1910 = 3

Seguimos el mismo procedimiento que el caso anterior.

Luego de esto podremos leer los parámetros calculados en base al siguiente modelo.

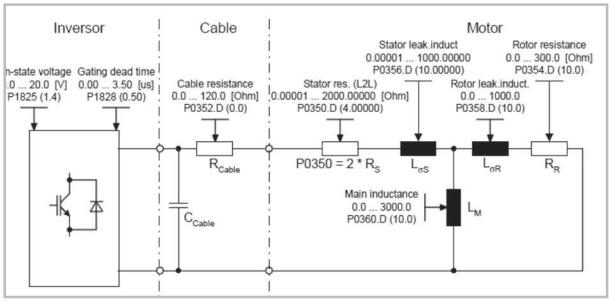


Figura 6. Modelo matemático del medio de transmisión y el motor

Para la obtención de los resultados las condiciones tomadas para el motor fueron:

1. Motor frio (si haber sido energizado por un lapso de 12 horas antes de la medición).

2. Se tomaron 4 mediciones y se promediaron con una resolución acorde a la escala mínima que el equipo proporciona.

3. La temperatura del motor en el momento de ejecutar las pruebas fue de aproximadamente 17 grados centígrados, medido con un termómetro de mercurio de laboratorio de sensibilidad igual a 0,1 grados.

Los resultados de este procedimiento los tenemos en los parámetros.

P0352 = 0,7016

P0350 = 14,712

P0354 = 3,164

P0356 = 22,125

P0358 = 24,187

P0360 = 260

Para la curva de magnetización se han obtenido:

P0362 = 53,5	P0366 = 50,0
P0363 = 78,3	P0367 = 75
P0364 = 128,9	P0368 = 137,5
P0365 = 150,4	P0369 = 174,6

Para determinar el valor de la capacitancia parásita del cable de conexión variador motor le aplicaremos una señal de 20 V de onda senoidal a cinco diferentes frecuencias (60 Hz, 1 kHz, 10 kHz, 100 kHz y 1 MHz), de las cuales, por diferencia de fase calcularemos el valor aproximado de la capacitancia parásita. (El cable usado es 4X16AWG de 1,32m).

Realizaremos un cuadro de mediciones de las pruebas efectuadas para el cable, en el cual usaremos un generador de señales Hameg HM8150 y un osciloscopio Aligent Technologies DSO3062A.

Para una red de la forma mostrada en la figura siguiente se tiene que la diferencia de fase se puede deducir de la siguiente manera.

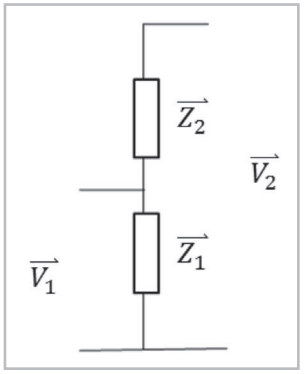
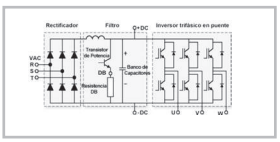


Figura 7:



(1)

Considerando a Z_2= resistencia del cable = R, Z_1 = la reactancia parásita entre faces. El valor de este último se deduce de la siguiente expresión para la capacitancia parásita Cp:

$$C_p = \left[\frac{\tan \emptyset}{R * 2 * \pi * f}\right] \quad (2)$$

Donde:

= desfase entre V_1 y V_2

f = Frecuencia de V_1

π = 3,1416

Los resultados se muestran en el cuadro siguiente.

Frecuencia	Diferencia de fase	Cp	
60 Hz	0,00143257	5,4286E-06	
1 kHz	0,001005312	2,2857E-07	
10 kHz	0,00331753	7,5429E-08	
100 kHz	0,002035757	4,6286E-09	
1 MHz	0,040966464	9,3195E-09	
		1,1493E-06	Promedio

Tabla 2: Calculo del valor aprox. de Cp.

Del cuadro tomamos un valor promedio del capacitor entre faces, para el rango entre 60 Hz y 10 kHz; Cp= 1,149uF. Con lo cual queda completo nuestro modelo del cable de conexión Drive motor.

III. DESCRIPCIÓN DE LA SONDA DE DETECCION DE CAMPO H

El modelo de sensor a usar es el HZ-552 (H-Field Probe) de la marca Hameg, que presenta como característica principal la posibilidad de sensar señales dentro del ancho de banda que muestra la siguiente figura:

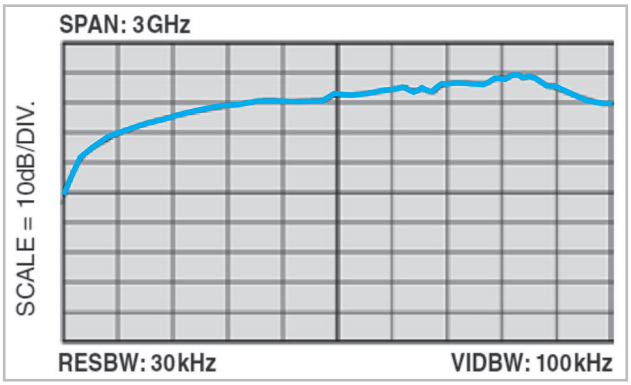


Figura 8. H-Field-Probe Frequency response (typical)

Esta sonda presenta un alto rechazo a campos eléctricos y gran permeabilidad, comparado con los sensores estándares de campo magnético. Las mediciones se pueden realizar en un entorno próximo a fuentes de radiaciones magnéticas. Está especialmente preparado para detectar puntos de emisión de campos H "HOT SPOTS" en tarjetas electrónicas o cableados.

Detecta fugas o perdidas de aislamiento magnético generadores de interferencia del tipo RFI.[5]

IV. DESCRIPCIÓN DE LA SONDA DE DETECCION DE CAMPO E

El modelo de sensor a usar es el HZ-551 (E-Field Probe) de la marca Hameg. El ancho de banda de respuesta está dado en la gráfica mostrada:

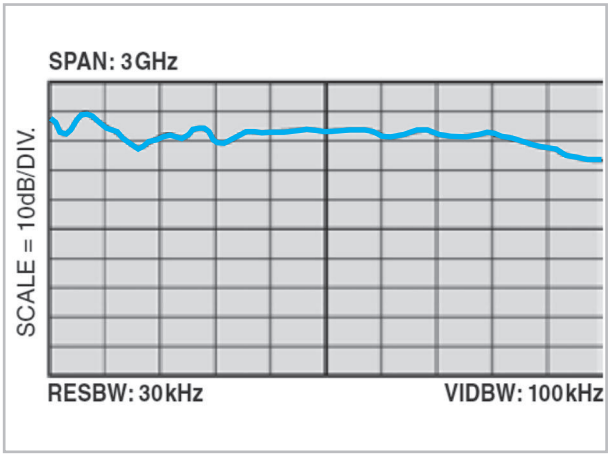


Figura 9. E-Field-Probe Frequency response (typical)

El sensor de campo E mono polo posee alta sensibilidad y puede ser usado como una antena de radio o TV. Con este sensor, toda la radiación proveniente de un circuito o equipo puede ser medido, por lo que es usado como elemento de prueba para apantallamientos [5].

V. MEDICIONES REALIZADAS DE SEÑALES RADIADAS

Mediante el uso de los sensores de campo H y campo E realizaremos mediciones de intensidad de señal a lo largo del cable de conexión (ver fig. 15) entre el Drive y el motor partiendo de la toma de señal en los bornes del motor, en tres puntos intermedios del cable y en los bornes del Drive. Las señales serán medidas en amplitud y frecuencia mediante la transformada rápida de Fourier a través de un osciloscopio en tiempo real. El procedimiento de medición implicará los siguientes pasos.

Se configurará el variador para mando local mediante panel del equipo y a una frecuencia de 60Hz.

Parámetros: P0700 = 1 y P1000 = 1

Con el uso de un medidor de armónicos tomaremos medida de la forma de señal en bornes del motor, lo cual se muestra a continuación (modelo: Fluke 41B, el cual permite obtener mediciones en frecuencia hasta el armónico 31, con una frecuencia de fundamental entre 6 Hz-99,99 Hz – datos del fabricante del equipo).

Señal de voltaje:

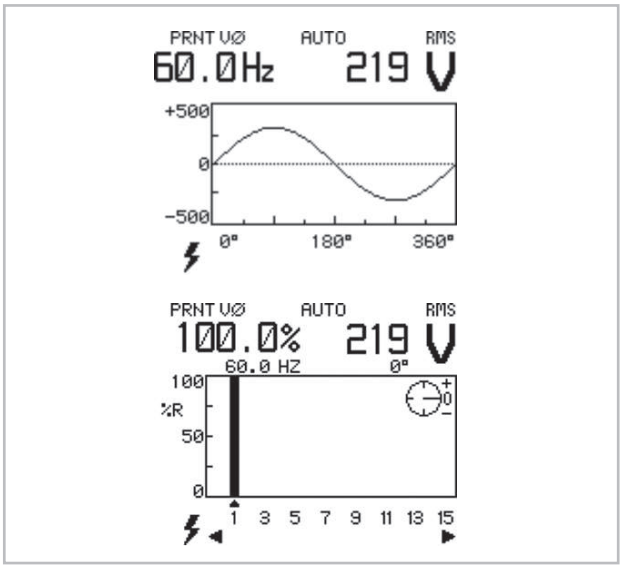


Figura 10. Señal de voltaje con bajísima carga armónica.

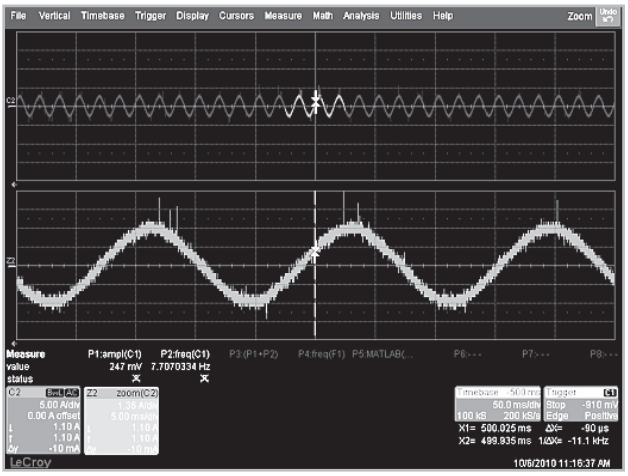


Figura 11. Señal de corriente transmitida al motor, vista con el uso de una sonda de medición de corriente marca LeCroy.

En el proceso de medición identificaremos la señal de corriente que es transmitida en el cable hacia el motor desde el Drive. debido a que la frecuencia de consigna es de 60 Hz. La forma de la señal es la mostrada a continuación.

En dicha imagen vemos que la señal de corriente es transmitida como una señal de tendencia senoidal, cuya frecuencia es de 60 Hz, pero que está compuesta por componentes armónicas, que son las que se observan en la ampliación de la imagen, en el cuadro inferior.

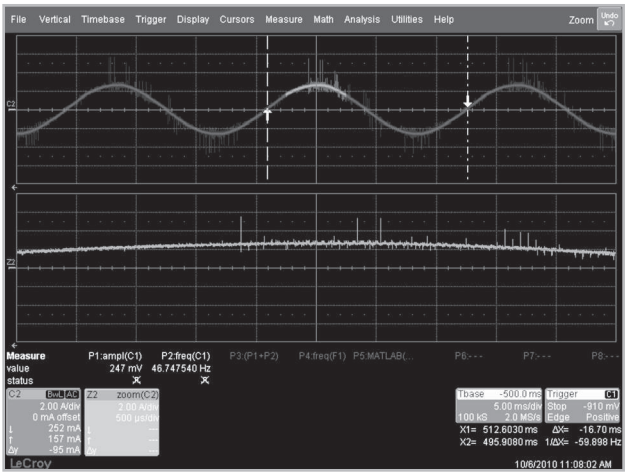


Figura 12. Señal de corriente ampliada para observar los detalles de picos de corriente en ella.

En la figura se presenta una ampliación de la imagen en la que se aprecia la presencia de ruido de alta frecuencia e incluso picos de corriente en la señal.

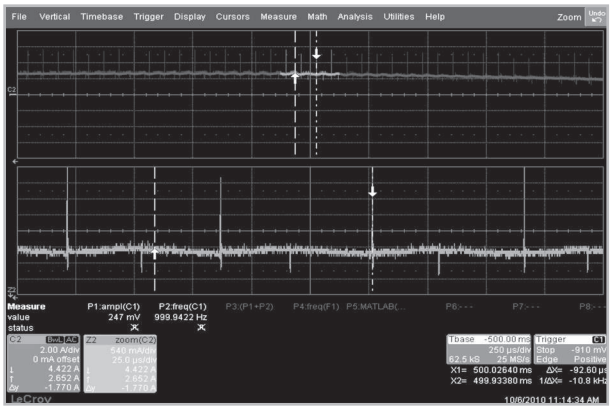


Figura 13. Señal mucho más ampliada en la que se observan con mayor detalle los picos de corriente que contiene.

Al realizar una ampliación mayor llegamos a medir amplitudes de pulsos de orden 1,77 A.

Es esta señal la que se sensará mediante las sondas E y H.

Al tomar las mediciones usando un analizador de armónicos de esta señal, podemos ver que presenta una gran carga armónica.

Señal de corriente:

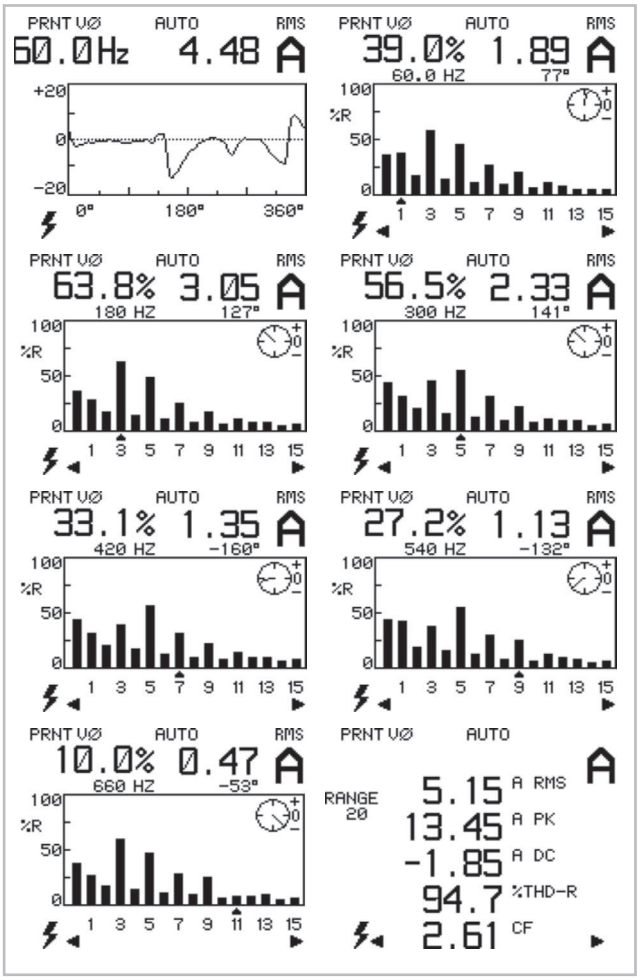


Figura 14. Espectro armónico de la señal de corriente medido con el Fluke 41B

En la señal de corriente se observa una carga armónica relativamente grande alcanzando una THD de 92,6 %.

Los armónicos de mayor relevancia son el 3º, 5º, 7º y 9º. El menor de ellos alcanza un porcentaje de 27,2 %, lo que equivale a aproximadamente 1,4 A. Valor próximo al medido anteriormente.

Es importante mencionar que la medición de corriente es por fase usando y que existe un factor de raíz de 3 entre los valores de fase y línea.

En las siguientes mediciones evidenciaremos si esa señal de corriente que va del Drive al motor puede generar algún tipo de interferencia que no sea de manera conducida.

Las mediciones de señales radiadas las tomaremos primero con el sensor de campo H y luego con la de campo E en base al siguiente patrón de mediciones (como el objetivo de este estudio es evidenciar la presencia de campo radiado, mas no de homologar o ratificar estándares internacionales de EMC, se realizaron las mediciones en función a un patrón definido para este caso en particular):

1. Se dividirá el área física que recorre el cable en dos partes que denominaremos cuadrantes y en los puntos indicados se tomarán mediciones con las dos sondas.

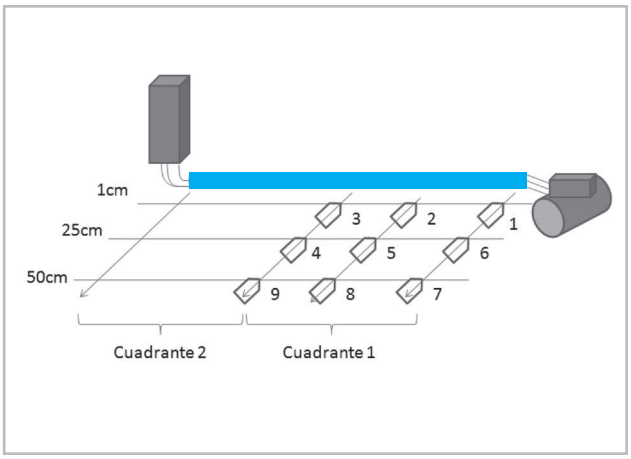


Figura 15. Distribución de los puntos de medición a lo largo del medio conductor de energía.

2. Al conectar la sonda de campo H se observa que la señal detectada en el punto 1 del cuadrante 1 es como se muestra en la grafica.

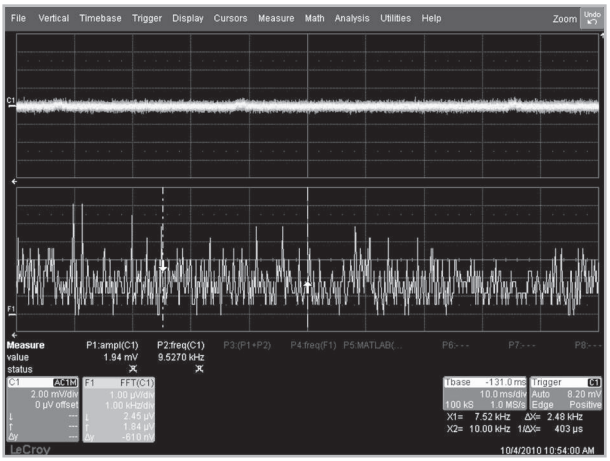


Figura 16. Señal de amplitud (arriba), espectro de la señal (abajo).

En la primera se muestra la señal en el dominio del tiempo y usando la FFT, para un rango en frecuencia de 1 kHz a 20 kHz , la amplitud de la señal detectada es menor a 1 mV y las armónicas poseen amplitudes que están por debajo de 4 uV. En la segunda se tomaron las mediciones a una frecuencia de 150,kHz obteniendo amplitudes del orden de 610 uV.

Esta tendencia se evidenció en los demás puntos del cuadrante. Tendiendo a disminuir la amplitud en los puntos 4, 5, 6, 7, 8 y 9.

3. A continuación se realizarán las mediciones con la sonda de campo E. en los mismos puntos del patrón mostrado anteriormente.

Comenzaremos con mostrar la señal detectada en el punto 1 en el dominio del tiempo. Recordemos que para la toma de esta señal no hay ninguna conexión física entre el sensor y el cable de conexión.

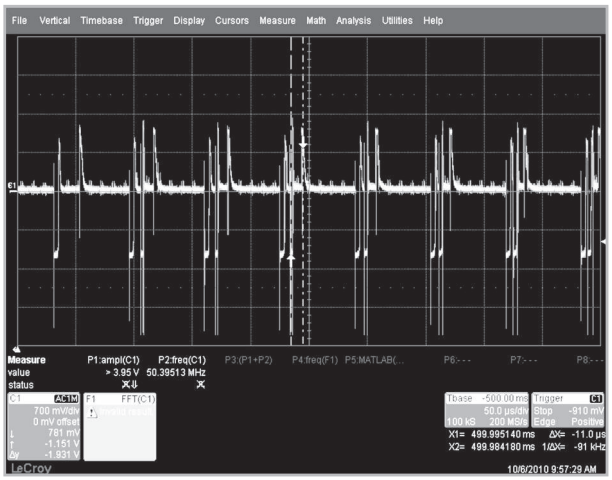


Figura 17. Señal de amplitud (arriba), espectro de la señal (abajo).

La imagen muestra picos de más de 2,1 V y con periodos de 75 uS, los que corresponden a pulsos generados por las cargas y descargas de las capacitancias parásitas del cable.

A continuación realizaremos la toma de los patrones del espectro que se irradia en cada pulso de las señales mostradas considerando un rango de frecuencias de 0 Hz a 500 kHz.

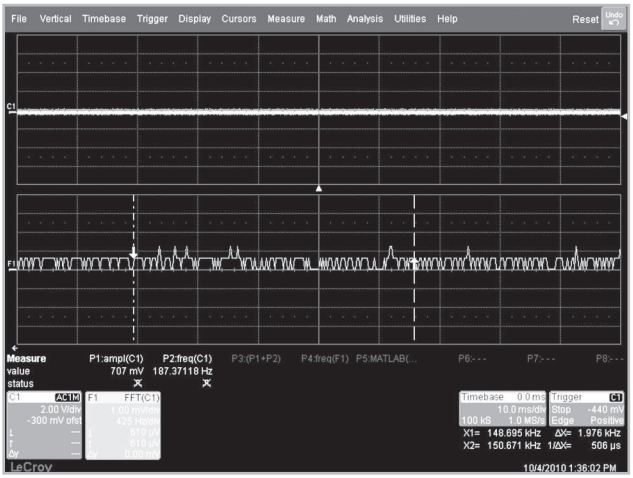


Figura 18. Señal de amplitud (arriba), espectro de la señal (abajo).

En el punto 1 tendremos:

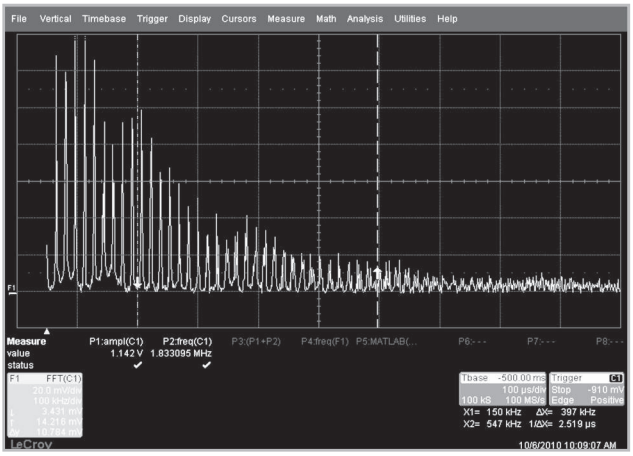


Figura 19. Espectro de la señal.

El espectro muestra componentes armónicas de amplitudes mayores a 120 mV, concentradas a frecuencias menores que 150 kHz. Si ampliamos en un entorno a 150 kHz, se muestra a continuación:

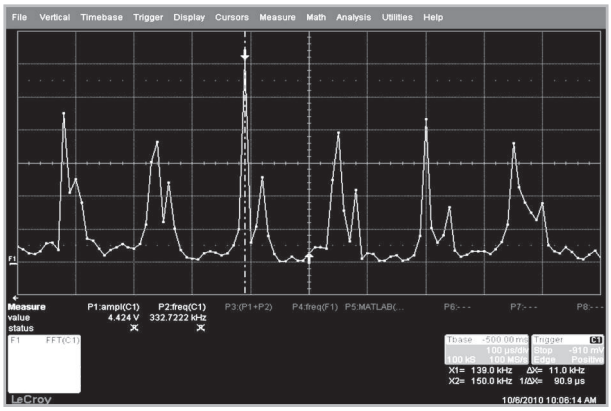


Figura 20. Espectro de la señal.

Se puede observar el detalle de las amplitudes alcanzadas; recordemos que en FFT cada pulso representado es matemáticamente modelado por una función senoidal.

En el punto 2 tendremos:

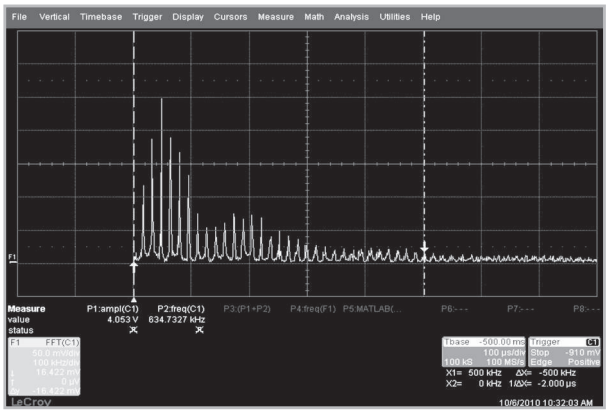


Figura 21. Espectro de la señal.

Espectro concentrado alrededor de 70 kHz con amplitud máxima de aprox. 200 mV picos mayores a 50 mV a frecuencias mayores a 150 kHz

En el punto 3:

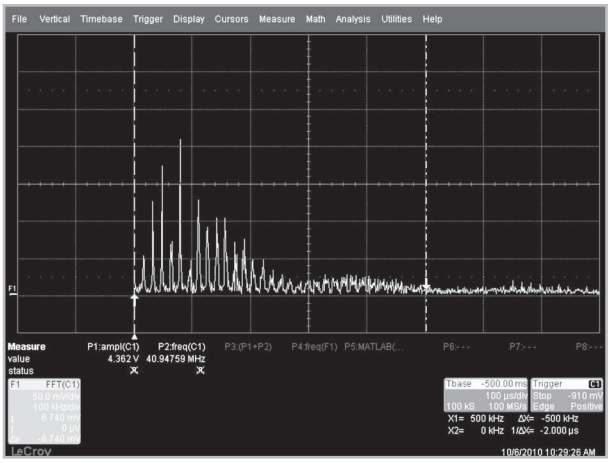


Figura 22. Espectro de la señal.

Mayor concentración de armónicos de mayor amplitud alrededor de 50 kHz, amplitudes máximas de 225 mV.

En el punto 4:

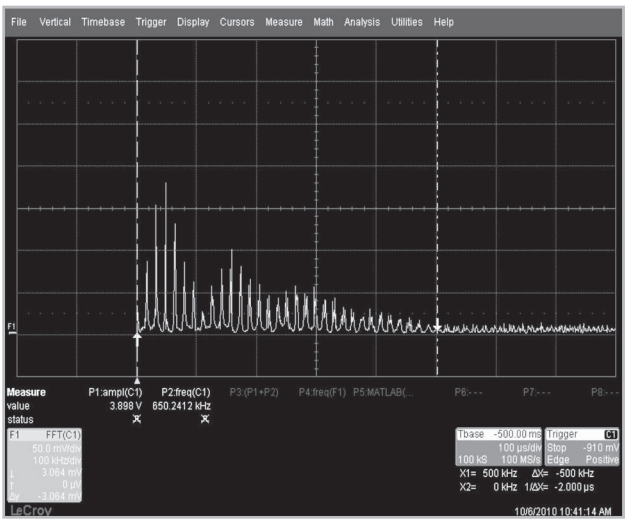


Figura 23. Espectro de la señal.

Mayor concentración de armónicos de mayor amplitud alrededor de 50 kHz, amplitudes máximas de 175 mV.

En el punto 5:

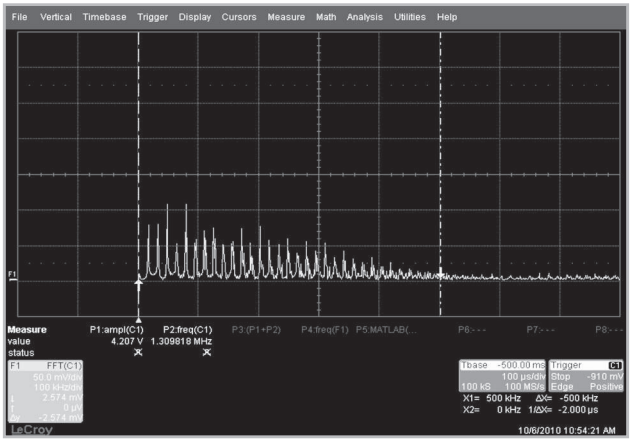


Figura 24. Espectro de la señal.

Concentración de armónicos aprox. uniforme hasta los 300 kHz de amplitudes promedio de 50 mV.

En el punto 6:

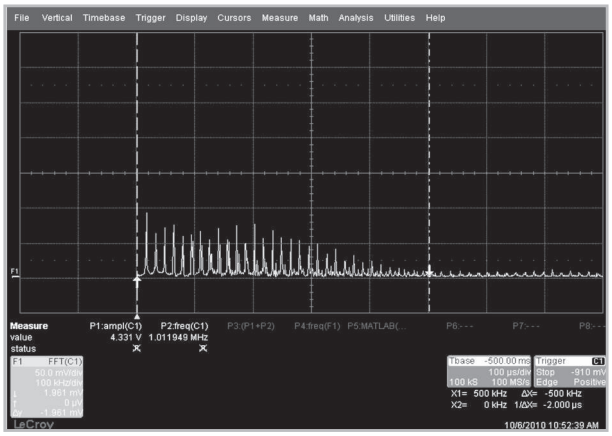


Figura 25. Espectro de la señal.

Concentración de armónicos aprox. uniforme hasta los 300 kHz de amplitudes promedio de 50 mV.

En el punto 7:

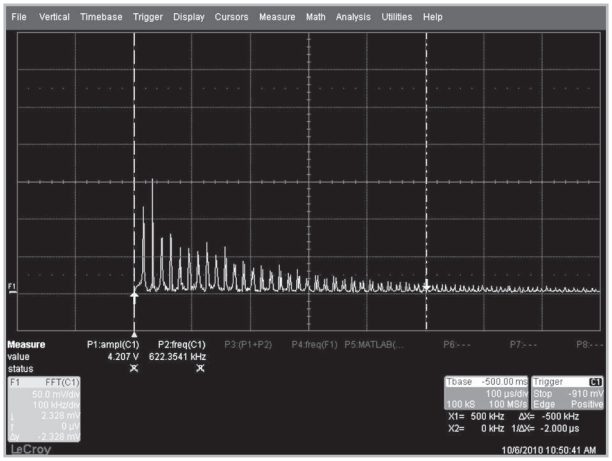


Figura 26. Espectro de la señal.

Marcada concentración de armónicos, mayor amplitud a una frecuencia menor que 50 kHz de amplitudes promedio de 125 mV.

En el punto 8:

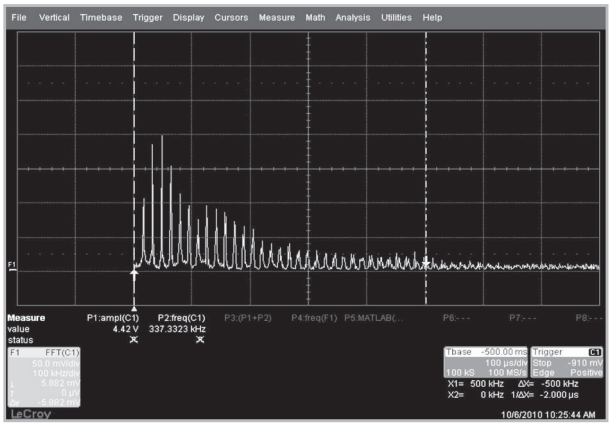


Figura 27. Espectro de la señal.

Marcada concentración de armónicos de mayor amplitud a una frecuencia menor que 200 kHz de amplitudes promedio de 175 mV.

En el punto 9:

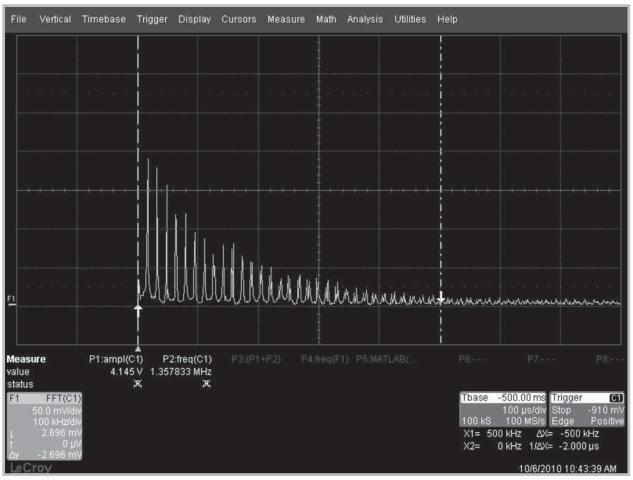


Figura 28. Espectro de la señal.

Marcada concentración de armónicos de mayor amplitud a una frecuencia menor que 200 kHz de amplitudes promedio de 125 mV. Se alcanzan los máximos a frecuencias menores a 20 khz, aprox.

En todos los casos se observa que, por encima de los 500 kHz, el rango de armónicos es inferior a 25 mV.

CONCLUSIONES

Del resultado obtenido en las mediciones realizadas es evidente que si bien en el proceso de transferencia de energía desde el Drive hacia el motor para su transformación, en este, en energía mecánica, se da de manera efectiva.

El transporte se realiza por un medio que presenta entre otros inconvenientes la presencia de una capacitancia parásita, que si bien posee valor promedio no muy grande, su comportamiento no está limitado a la frecuencia de consigna del motor si no que genera un proceso de cargas y descargas en función a la velocidad de conmutación de los transistores que operan en la etapa inversora del Drive.

En el mercado tecnológico es posible encontrar inversores de voltaje y de corriente de una gran variedad, equipos fabricados con una muy diversa tecnología.

Entonces el estudio realizado evidencia que podemos medir y analizar el fenómeno de EMI de manera directa sin la necesidad de realizar un modelado complejo del sistema. Al margen, vemos y confirmamos que son los armónicos de corriente los que desarrollan la capacidad de inducir al medio de transpor-

te (el cable de conexión entre el Drive y el motor) a radiar señales que no se pueden evidenciar con instrumentos de uso cotidiano, como pueden ser multímetros u osciloscopios estándares.

Es importante que los técnicos que operan equipos de este tipo posean sólidos conocimientos del estudio de señales no senoidales y su tratamiento mediante el uso de la transformada de Fourier, lo cual les permitirá poder interpretar información que, de otra manera, resultaría confusa y fácilmente pasada por alto.

De las mediciones y los espectros obtenidos se ve que el efecto de campo magnético es prácticamente nulo como efecto de radiación y posible causa de interferencia debido a su bajísimo valor de amplitud a lo largo de todo el cable de conexión.

Cosa que no sucede en el caso de la señal detectada mediante la sonda de campo E, en la que si se percibe un espectro relativamente grande en amplitud y rango de frecuencias que llegan a abarcar desde casi cero hasta aproximadamente los 500 kHz. Esto indica que pueden ser fácilmente causa de interferencia radiada, pues cubre ampliamente la referencia de los 150 kHz [3].

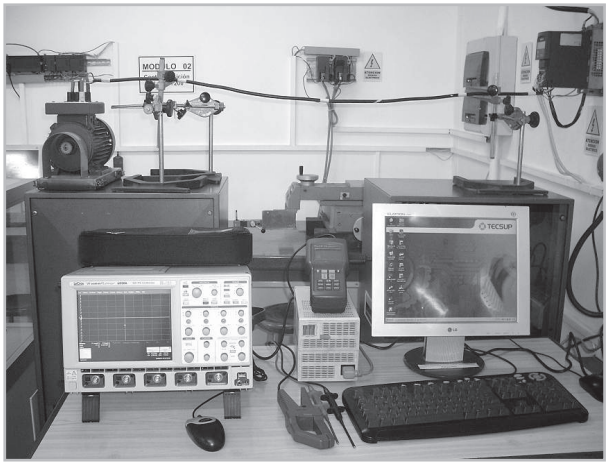


Figura 29. Equipo usado para las mediciones.

Podemos, en este punto, llamar la atención al hecho de que, si bien los rangos de amplitud de señales radiadas no parecen importar debido al valor que presentan (no superan 1 voltio), recordemos que al tener en ambientes industriales Drives de rangos de potencias mayores y en un número de equipos que en muchos casos se cuentan en el orden de la decenas, las señales que conforman los patrones de los espectros al poseer igual frecuencia se sumarán, reforzándose e incrementando su amplitud.

Es por lo tanto evidente la presencia de EMI en el tramo del cable, como medio de transporte de energía.

Finalmente, podemos decir que existen soluciones tecnológicas que nos permiten aminorar este efecto tales como los filtros, apantallamientos (Jaulas de Faraday), resistencias de terminación; por mencionar algunos. Los cuales entran ya en el tema de Calidad de Energía.

REFERENCIAS

[1] SIEMENS. *Manual de Usuario Micromaster 440*, Documento 6SE6400-5AW00-0EP0, Siemens AG, Alemania, 2000.

[2] ELLIS. *Interferencias electricas*. Handbook, Paraninfo , Madrid, 1999.

[3] WILLIAMS, TIM. *EMC control y limitación de energía electromagnética*, Paraninfo, Madrid, 1997.

[4] LECROY. *Operator´s Manual WaveRunner 6000A*, Version febrero, 2005.

[5] HAMEG Instruments GmbH. *Operator´s Manual Near Field Probe, HAMEG Instruments GmbH, Industriestraße 6, D-63533 Mainhausen*, 2008.

ACERCA DEL AUTOR

José J. Lazarte Rivera recibió el grado de Bachiller en Ciencias y el título profesional en Ingeniería Electrónica, por la Universidad Nacional de Ingeniería. Ha participado en programas de entrenamiento en Aplicaciones Industriales de la Electrónica en el Instituto Politécnico de Inchon, en Corea del Sur. Tiene experiencia en mantenimiento electrónico y desarrollo de soluciones en el campo de la Electrónica Industrial, habiendo realizado diversas actividades de consultoría para empresas locales. Es profesor a tiempo completo en TECSUP y dicta cursos relacionados con electrónica analógica y digital, tiene a su cargo el Laboratorio de Electrónica de Potencia en el Departamento de Electrónica de TECSUP. Participa también en el dictado de cursos de Especialización para profesionales de la industria, especialmente en temas de Control Electrónico de Potencia y Control Automático de Motores Eléctricos.

Original recibido: 7 de octubre de 2010
Aceptado para publicación: 21 de octubre de 2010

Robust nonlinear torque control of a permanent magnet synchronus motor

Control robusto del torque de un motor sincrónico permanente

Arturo Rojas, *Tecsup*

Resumen

El problema del control del torque de un MSIP (Motor Síncrono de Imán Permanente) ha sido resuelto empleando algoritmos de control convencionales, tales como CDT (Control Directo del Torque) o COC (Control Orientado por Campo). Sin embargo, en la actualidad se están usando algoritmos de control no convencionales para dicho propósito. Una de las razones es que los métodos CDT y COC son poco robustos, comparado con otros, tales como control por modos deslizantes o control backstepping. En este artículo se emplea un controlador con modos deslizantes para controlar el torque electromagnético de un MSIP Interior (MSIPI). Intensivos estudios de simulación verifican que el sistema de control de torque por modos deslizantes diseñado es robusto porque posee la capacidad de que la salida controlada, el torque electromagnético, siga una trayectoria deseada y arbitraria de torque, a pesar de la presencia simultánea de cambios, tanto en los parámetros del motor, en el torque de carga, como en las corrientes.

Abstract

The torque control problem of a PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor) has been the solved employing conventional control algorithms like DTC (Direct Torque Control) or the FOC (Field Oriented Control). However, non conventional control algorithms are being used nowadays for such a purpose. One of the reasons is that the DTC and FOC methods are weakly robust compared with others, like sliding mode or backstepping control. In this paper, a nonlinear sliding mode controller is employed to control the electromagnetic torque of an Interior PMSM (IPMSM). Intensive simulation studies verify that the designed sliding mode torque control system is robust because such a system is capable of tracking an arbitrary desired torque trajectory despite the presence of simultaneous changes in motor parameters, load torque and currents.

Palabras Clave

MSIP (Motor Síncrono de Imán Permanente), control por modos deslizantes, control robusto, control del torque electromagnético.

Key words

PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor), sliding mode control, robust control, electromagnetic torque control.

INTRODUCTION

It is a fact that the PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor) has attracted increasing interest in recent years for industrial drive application such as robotics, adjustable speed and torque drives, electric vehicles, and HVAC (Heating, Ventilating, and Air Conditioning) machines. The PMSM drives are characterized for its low inertia, high efficiency, high power density and reliability. Those characteristics make a PMSM an excellent alternative in applications where fast and accurate torque responses are required, like in electric vehicles.

The torque control problem of a PMSM has been resolved employing conventional control algorithms like DTC (Direct Torque Control) or FOC (Field Oriented Control). However, non conventional control algorithms are being used nowadays for such a purpose. One of the reasons is that the DTC and FOC methods are fairly robust compared to others.

A control system is called robust if its response is able to track an arbitrary reference signal fulfilling certain design specifications despite the presence of non modelling dynamics, parameter uncertainty, and changing disturbances. The two major classes of controllers that are capable of dealing with the robustness problem are adaptive and robust controllers. Sliding mode controllers belong to the class of robust controllers.

In general, the torque control of a PMSM can be achieved by regulation of direct and quadrature currents i_d and i_q in closed loop. For SPMSM, the correspondence between the electromagnetic torque Te and i_q is direct, that is

$$T_e = \frac{3}{2} p \, \phi_m \, i_q \tag{1}$$

while for IPMSM such a correspondence involves both i_d and i_q currents

$$T_e = \frac{3}{2} p \, [\phi_m \, i_q - (L_q - Ld) i_q \, i_d] \qquad (2) \tag{2}$$

To achieve a torque-tracking objective, voltage inputs are designed to assure the convergence of (i_d, i_q) to their desired trajectories (i_{d^*}, i_{q^*}). For SPMSM, i_d is set to zero, while for IPMSM i_d is arbitrary. Therefore, the torque control of SPMSM can be considered a particular case of torque control of IPMSM. This study deals with the torque control of IPMSM.

MODELLING AN IPMSM

The dynamic model of an IPMSM in a synchronous frame, known as the d-q frame, and can be represented as follows [1]

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{v_d}{L_d} - \frac{R}{L_d} i_d + pW_r \frac{L_q}{L_d} i_q \tag{3}$$

$$\frac{di_q}{dt} = \frac{v_q}{L_q} - \frac{R}{L_q} i_q - pW_r \frac{L_d}{L_q} i_d - pw_r \frac{\phi_m}{L_q} \tag{4}$$

$$\frac{dw_r}{dt} = \frac{3p\phi_m}{2J} i_q - \frac{3p}{2J} (L_q - L_d) \, i_d i_q - \frac{B}{J} w_r - \frac{1}{J} T_L \tag{5}$$

$$T_e = \frac{3}{2} p[\phi_m i_q - (L_q - L_d) \, i_d i_q] \tag{6}$$

Such a dynamic model can be transformed into its Lagrangian representation

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_d}{dt} \\ \frac{di_q}{dt} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Ri_d - pW_r L_q i_q \\ Ri_q + pw_r L_d i_d + pw_r \phi_m \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{v} = \mathbf{P} \frac{d\mathbf{i}}{dt} + \mathbf{d} \tag{7}$$

Table 1. Describes all variables and parameters of the IPMSM.

Table 1. Variables and valued parameters of the IPMSM.

Symbol	Description
i_d, i_q	stator d– and q–axes currents (A)
v_d, v_q	stator d– and q–axes voltages (V)
φd, φq	stator d– and q–axes flux linkages (H–A)
φm	flux created by rotor magnet (0.0122 H–A)
R	stator resistance (4.1 ohm)
L_d	stator d–axes inductance (0.068 H)
L_q	stator q–axes inductance (0.078 H)
T_e, TL	electromagnetic and load torques (N–m)
J	moment of inertia (78×10–7 Nm/rad–s_2)
B	friction coefficient (11×10–5 Nm/rad–s)
p	number of poles pairs (2)
w_r	rotor speed (rad/s
w	inverter speed (rad/s)

THE SLIDING MODE CONTROL APPROACH

The sliding mode control algorithm employed in this study has been successfully implemented to control robot manipulators [2]. This algorithm uses the following Lagrangian representation of a nonlinear system.

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{P}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{d}(\mathbf{q}) = \mathbf{u} \tag{8}$$

where $\mathbf{q}$ is an $m \times 1$ vector of generalized coordinates, $\mathbf{M(q)}$ is an $m \times m$ positive-definite inertia matrix, $\mathbf{P(q, \dot{q})}\,\dot{\mathbf{q}}$ is an $m \times m$ matrix representing Coriolis and centripetal forces, $\mathbf{d(q)}$ is an $m \times 1$ vector representing gravitational forces, and $\mathbf{u}$ is an $m \times 1$ vector of generalized forces applied at each joint. The state vector corresponding to (8) has the form

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \mathbf{q} \\ \dot{\mathbf{q}} \end{bmatrix} \qquad \mathbf{q} = \begin{bmatrix} q_1 \\ \vdots \\ q_m \end{bmatrix} \tag{9}$$

Let $\mathbf{qd}(t)$ and $\dot{\mathbf{q}}\mathbf{d}(t)$ represent the desired vector trajectories of order m, which are assumed to be continuously differentiable functions of time. The error vectors of order m are defined as

$$\tilde{\mathbf{q}}(t) = \mathbf{q} - \mathbf{q}_d \qquad \dot{\tilde{\mathbf{q}}}(t) = \dot{\mathbf{q}} - \dot{\mathbf{q}}_d \tag{10}$$

A) The Switching Surface

Let the vector s of order m be a switching surface of the form

$$\mathbf{s}(\mathbf{x}, t) = \mathbf{s}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t) = \mathbf{L}\tilde{\mathbf{q}} + \dot{\tilde{\mathbf{q}}} \tag{11}$$

where

$$\mathbf{s}(.) = \begin{bmatrix} s_1(.) \\ \vdots \\ s_m(.) \end{bmatrix} \qquad \mathbf{L} = diag[\ell_{ii}] \qquad i = 1, \ldots, m$$

where ℓii are positive constants. Assuming that a designed control force is capable of confining all trajectories originating on the intersection of surfaces *si(.), i = 1, . . . ,m* to remain there, then we shall have *s(.) = 0*, which in turn means that *˜q(t)* and *¨˜q(t)* will converge exponentially to zero. Therefore, in such a situation, *qi(t) = qdi(t) and q ̇i(t) = q ̇di(t)*.

B) Design of the Control Law

Omitting the dependence of the arguments for simplicity, consider the following Lyapunov–function candidate

$$V = \frac{1}{2}\,\mathbf{s}^T\mathbf{M}\mathbf{s}$$

Also, define the following control law

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_m \end{bmatrix} = \mathbf{u}_0 - \mathbf{U}sgn(\mathbf{s}) \tag{12}$$

$$\mathbf{u_o} = \frac{1}{2}\begin{bmatrix} u_1^+ + u_1^- \\ \vdots \\ u_m^+ + u_m^- \end{bmatrix} \qquad \mathbf{U} = \frac{1}{2}\,diag\,[u_i^+ - u_i^-]$$

where *i = 1, . . . ,m*. The designed control law **u** must verify the well-known sliding condition

$$\frac{1}{2}\,\frac{d\,s_i^2}{dt} = \dot{s}_i\,s_i \le -\varepsilon\,|s_i| \tag{13}$$

to guarantee the solution of the stabilization problem.

The derivative of s (relation (11)) along a trajectory produces

$$\dot{\mathbf{s}} = \mathbf{L}\dot{\tilde{\mathbf{q}}} + \ddot{\tilde{\mathbf{q}}} = \mathbf{L}\dot{\tilde{\mathbf{q}}} + (\ddot{\mathbf{q}} - \ddot{\mathbf{q}}_d) \tag{14}$$

Extracting $\ddot{q}$ from (8) and substituting in (14) leads to

$$\dot{\mathbf{s}} = \mathbf{M}^{-1}\,(\mathbf{u}_0 - \mathbf{U}\,sgn(\mathbf{s}) - \mathbf{u}_{eq})$$

where

$$\mathbf{u}_{eq} = -\mathbf{M}\mathbf{L}\dot{\tilde{\mathbf{q}}} + \mathbf{P}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{d} + \mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}}_d$$

Therefore

$$\dot{V} = \mathbf{s}^T\mathbf{M}\dot{\mathbf{s}} + \frac{1}{2}\,\mathbf{s}^T\dot{\mathbf{M}}\mathbf{s} = \mathbf{s}^T[\mathbf{u}_0 - \mathbf{U}sgn(\mathbf{s}) - \mathbf{u}_{eq}] + \frac{1}{2}\mathbf{s}^T\dot{\mathbf{M}}\mathbf{s} \tag{15}$$

It is well known in robotics that

$$\mathbf{P} = \frac{1}{2}\left[\dot{\mathbf{M}} - \mathbf{J}\right] \tag{16}$$

where **J** is a skew-symmetric matrix, that is: **J = −JT** .

Employing (16) in (15) leads to:

$$\dot{V} = \mathbf{s}^T[\mathbf{u}_0 - \mathbf{U}sgn(\mathbf{s}) + \mathbf{P}\mathbf{s} - \mathbf{u}_{eq}] + \frac{1}{2}\mathbf{s}^T\mathbf{J}\mathbf{s}$$

Since s^T **Js = 0** due tothe fact that **J** is a skew-symmetric matrix, then

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \mathbf{s}^T[\mathbf{u}_0 + \mathbf{P}\mathbf{s} - \mathbf{u}_{eq}] - \mathbf{s}^T\mathbf{U}sgn(\mathbf{s}) \\ &= \sum_{i=1}^{m} s_i[\mathbf{u}_0 + \mathbf{P}\mathbf{s} - \mathbf{u}_{eq}]_i - U_i\sum_{i=1}^{m}|s_i| \\ &\le \sum_{i=1}^{m}|s_j[\mathbf{u}_0 + \mathbf{P}\mathbf{s} - \mathbf{u}_{eq}]_i| - \sum_{j=1}^{m}U_i|s_i| \end{aligned} \tag{17}$$

Choosing:

$$U_i \ge |[\mathbf{u}_0 + \mathbf{P}\mathbf{s} - \mathbf{u}_{eq}]_i| + \varepsilon \qquad \varepsilon > 0 \tag{18}$$

then the, substitution of (18) in (17) produces:

$$\dot{V} \le -\varepsilon\sum_{i=1}^{m}|s_i| \qquad \varepsilon > 0$$

and guaranties that $\tilde{q}(t)$ and $\dot{\tilde{q}}(t)$ converge exponentially to zero.

Be $\hat{\mathbf{u}}_{eq}$ and $\hat{\mathbf{P}}$ the estimates of **u** and **P** respectively. The control forces u_i^- y u_i^+ can be selected to satisfy

$$\left.\begin{aligned} u_i^+ &= [\hat{\mathbf{u}}_{eq} - \hat{\mathbf{P}}\mathbf{s}]_i + \bar{u}_i^+ \\ u_i^- &= [\hat{\mathbf{u}}_{eq} - \hat{\mathbf{P}}\mathbf{s}]_i + \bar{u}_i^- \end{aligned}\right\} \qquad i = 1, \ldots, m \tag{19}$$

If we choose:

$$\bar{u}_i^+ = K_i \qquad \bar{u}_i^- = -K_i \tag{20}$$

then we can obtain:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_0 &= \frac{1}{2}\begin{bmatrix} u_1^+ + u_1^- \\ \vdots \\ u_m^+ + u_m^- \end{bmatrix} = \hat{\mathbf{u}}_{eq} - \hat{\mathbf{P}}\mathbf{s} \\ \mathbf{U} &= \frac{1}{2}\,diag\,[u_1^+ - u_1^-] = diag\,[K_i] \end{aligned} \tag{21}$$

Assuming that the gravitational term can be expressed as:

$$\mathbf{d} = \hat{\mathbf{u}}_{eq} - \hat{\mathbf{P}}\mathbf{s} \tag{22}$$

then the control law given by (12) takes on the form:

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_0 - \mathbf{U}sign(\mathbf{s}) = \mathbf{d} - diag\,[K_i]sgn(\mathbf{s}) \qquad (23)$$

and the relation (18) with $U_i = K_i$ becomes

$$K_i \geq |[\mathbf{u}_{eq} - \mathbf{P}\mathbf{s} - \mathbf{d}]_i| + \varepsilon$$

Now, since $\mathbf{u}_{eq} = -\mathbf{M}\mathbf{L}\tilde{\dot{\mathbf{q}}} + \mathbf{P}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{d} + \mathbf{M}\dot{\mathbf{q}}_d -$, then the gains K_i can be selected only if:

$$K_i \geq |(-\overline{\mathbf{M}}\,\mathbf{L}\dot{\tilde{\mathbf{q}}} + \overline{\mathbf{P}}\,\dot{\mathbf{q}} + \overline{\mathbf{M}}\,\dot{\mathbf{q}}_d - \overline{\mathbf{P}}\,\mathbf{s})_i| + \varepsilon \qquad (24)$$

where $\overline{\mathbf{M}}$ and $\overline{\mathbf{P}}$ are upper bounds of $\mathbf{M}$ and $\mathbf{P}$, respectively.

TORQUE CONTROL OF THE IPMSM

The developed sliding control system is designed to achieve a torque–tracking objective by means of the currents tracking objective. The tracking errors given by (10) and their derivatives are:

$$\tilde{q}_1 = i_d - i_d^* \qquad \frac{d\tilde{q}_1}{dt} = \frac{di_d}{dt} - \frac{di_d^*}{dt}$$

$$\tilde{q}_2 = i_q - i_q^* \qquad \frac{d\tilde{q}_2}{dt} = \frac{di_q}{dt} - \frac{di_q^*}{dt}$$

where $\frac{di_d}{dt}$ and $\frac{di_q}{dt}$ are given by (4) and (5), respectively. The sliding surfaces are given by (25)

$$s_1 = \ell\,\tilde{q}_1 + \frac{d\tilde{q}_1}{dt} \qquad s_2 = \ell\,\tilde{q}_2 + \frac{d\tilde{q}_2}{dt} \qquad (25)$$

Let select the upper bound of matrix $\mathbf{P}$ of the Lagrangian representation of the IPMSM given by (7) as:

$$\overline{\mathbf{P}} = \begin{bmatrix} \overline{L}_d & 0 \\ 0 & \overline{L}_q \end{bmatrix}$$

Note that there exists no matrix $\mathbf{M}$ for the Lagrangian representation of the IPMSM. Using (24), the control gains are found to be:

$$K_i \geq |\overline{P}(\dot{\mathbf{q}} - \mathbf{s})|_i + \varepsilon \qquad i = 1, \ldots, m$$

Finally, the control law given by (26) takes on the form:

$$\mathbf{u} = \mathbf{d} - diag\,[K_i]sat(\mathbf{s}) \qquad (26)$$

where the vector $\mathbf{d}$ is given by (7) and the function sign has been replaced by the function *sat* (saturation) to diminish the control force activity.

SIMULATION STUDIES

Figs. 1 and 2 show the simulation results performed with MATLAB®. Observe in Fig. 1 that the sliding control system is capable of stabilizing the currents i_d and $i_{q'}$; therefore, the electromagnetic torque T_e, despite the presence of a varying load torque T_L. On the other hand, Fig. shows the behaviour of the control voltages v_d and $v_{q'}$ the angular speed ωr, and the sliding surfaces1 inside the sliding mode control system of an IPMSM.

CONCLUSIONS

Simulation studies constitute an important part in the design an implementation procedures of a control system. Such studies permit the analysis and synthesis of the control system operating under different circumstances. This work uses simulation as a tool to verify the performance of the designed torque control system.

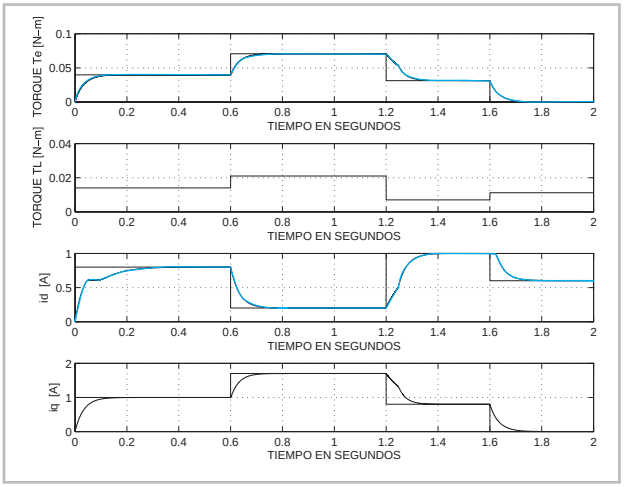


Figura 1. Torque and current control of an IPMSM.

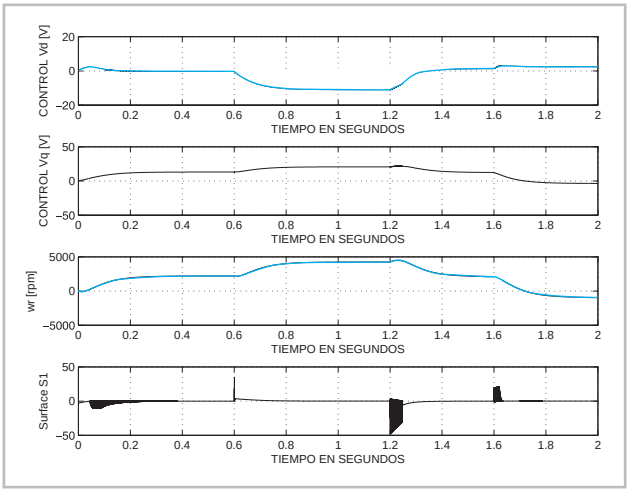


Figura 2. Control voltages v_d and $v_{q'}$ the angular speed !r and the sliding surface s1 inside the sliding mode control system of an IPMSM.

Conventional control algorithms like the DTC (Direct Torque Control) or the FOC (Field Oriented Control) are being used to resolve the torque control problem of a PMSM. However, such control methods are weakly robust because the designed control system presents a low performance operating in the presence of non modelling dynamic, parameter uncertainty, and changing disturbances.

A PMSM drive in combination with a robust control algorithm, is an excellent alternative in applications where fast, accurate and robust torque response are required.

The torque control system of a PMSM presented in this work combines a sliding control algorithm with a PMSM drive. Intensive simulation studies have demonstrated that the designed nonlinear sliding mode controller is robust because of its ability to stabilize the electromagnetic torque of an IPMSM despite the presence of simultaneous changes in motor parameters, load torque and currents.

The next step will be the implementation of the designed sliding mode control system for real–time operations.

REFERENCES

[1] CARRILLO ARROYO, E. L. *Modeling and Simulation of Permanent Magnet Synchronous Motor Drive System*, Master of Science Thesis in Electrical Engineering, University of Puerto Rico, Mayagüez, 2006.

[2] XIANPENG, LIU SHI; SHIRONG, FEI LIU. *Sliding Mode Control of Robot Manipulators with Luenberger-style Observer*, 8th IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA), June 2010.

ACERCA DEL AUTOR

Arturo Rojas Moreno recibió el grado de Bachiller y el título profesional en Ingeniería Mecánica y Eléctrica, y el grado de MS en Ingeniería Electrónica, por la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI). También tiene el título de Diplom.-Ingenieure (f.a.) en Electrotécnica por la Universidad Técnica de Munich, Alemania, y el grado Ph.D. en Ingeniería Eléctrica por Utah State University, EE.UU. Realizó un post doctorado en el Laboratorio de Dinámica Espacial en Logan, EE.UU. y estadías de investigación tanto en el Instituto de Control Automático de la Universidad Técnica de Aachen, Alemania como en General Motors Institute, Flint, EE.UU. Trabajó como Ingeniero de Control por doce años en la planta de fibras de Bayer A.G. (Alemania y Lima). Ha sido Profesor Principal de las universidades UNI, UCCI (Huancayo) y de la UTP. Actualmente trabaja para el departamento de Electrónica de Tecsup en Lima. Sus temas de interés son control no lineal multivariable y procesamiento de señales para medición y control.

Original recibido: 29 de setiembre de 2010
Aceptado para publicación: 7 de octubre de 2010

Rhenium: Chemistry, Metallurgy, and History

Renio: Química, Metalurgia e Historia

Fathi Habashi, *Laval University*

Resumen

El renio, número atómico 75, peso atómico 186,2 fue descubierto en Alemania en 1925 por la joven química Ida Noddack, de 26 años, nacida en Tacke (1896-1978). El metal demostró ser un metal refractario con un punto de fusión 3180 ºC –la temperatura de fusión más alta después de la del tungsteno, que tiene el punto de fusión en 3380 ºC. Así, el renio se convirtió en un metal muy útil para preparar las aleaciones de fusión elevada. Se produce principalmente de los concentrados de la molibdenita separados de la chalcopirita.

Abstract

Rhenium, atomic number 75, atomic weight 186,2 was discovered in Germany in 1925 by the 26 year old chemist Ida Noddack, born Tacke (1896-1978). The metal proved to be a refractory metal with a melting point 3180 ºC –the highest melting temperature after Tungsten, which has a melting point of 3380 ºC. Thus rhenium became a very useful metal for preparing high-melting alloys. It is produced mainly from molybdenite concentrates separated from chalcopyrite ores.

Palabras clave

Molibdenita, cobre porfirítico, chalcopirita, metales refractarios, MOLYMET en Chile

Key words

Molybdenite, Porphyry copper, Chalcopyrite, Refractory metals, MOLYMET in Chile

INTRODUCTION

Rhenium is present in the earth's crust at a very low concentration (ca. 7 x 10^{-8} % or 0.7 ppm). It does not form its own minerals but exists in trace amounts associated with molybdenite in porphyry copper ores. Molybdenite veins in quartz are rhenium free. At present, rhenium is mainly recovered from the dust collected during the roasting of molybdenite concentrate associated with porphyry copper ores. The dust contains considerable amounts of Re2O7, which is solubilized in water. The solution is purified by ion exchange and then ammonia added to precipitate pure ammonium perrhenate, from which metallic rhenium can be obtained by reduction with hydrogen. The powder is compacted, vacuum pre-sintered, and then hydrogen sintered at high temperature. The content of rhenium in the molybdenite concentrate is usually 500 to 700 ppm, and the content of molybdenum in the copper concentrate is about 0.05% from which it is separated by flotation. The copper concentrate is normally obtained by flotation of copper sulfide minerals from an ore containing 1-2% Cu. Hence, the long journey of rhenium from ore to metal can be appreciated in Figure 1.

INDUSTRIAL PRODUCTION

The introduction of accurate analytical methods enabled material balances for rhenium extraction to be established. These showed that most of the rhenium was lost up the stack, and only a small amount remained in the flue dust or in the roasted product. The flue gas was therefore scrubbed intensively to ensure that the volatile oxides of rhenium were recovered when the molybdenite concentrate was roasted.

The first industrial production of rhenium took place in Leopoldshall in Germany in the late 1920s. The raw material was furnace crust from carbonaceous copper shist ore (Kupferschiefer) from the Mansfeld District. About 100 kg of the metal was produced by a complicated process, but the price was so high that production was discontinued. In the USA, 17 tons of dust from a molybdenite roasting furnace were treated over a period of 10 years starting in 1942 at the University of Tennessee to recover 110 kg rhenium in the form of potassium perr-

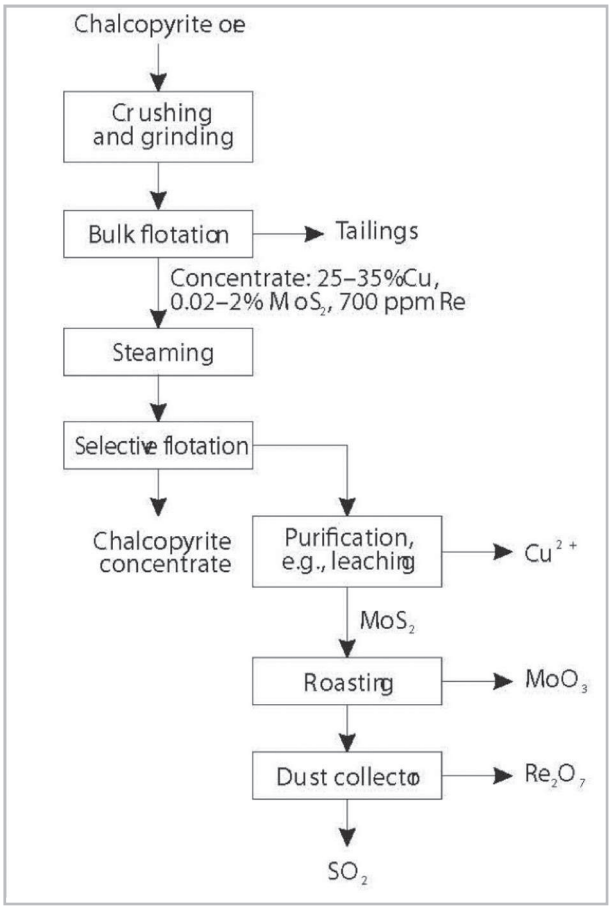


Figure 1. Rhenium recovery from chalcopyrite concentrates

henate. Rhenium production started in the former USSR in 1948 also from molybdenite roasting dust. In the early 1950s production started again at the Mansfeld Kombinat "Wilhelm Pieck" (former German Democratic Republic) from a lead-zinc flue dust.

In 1953, S.R. Zimmerley, E.E. Malouf, and others at the Kennecott Research Center in Salt Lake City, Utah initiated a study of recovery methods, recognizing that molybdenite concentrates obtained from Kennecott properties in Utah, New Mexico, Nevada, and Chile represented the largest potential source of rhenium in the Western world. This work resulted in an improved process based on wet scrubbing of the off gases from the roasting of molybdenite, followed by concentration of rhenium from the solution by ion exchange. With the cooperation of the Molybdenum Corporation of America, a commercial recovery facility was installed at the company's plant in Washington, Pennsylvania where the major portion of Kennecott's molybdenite was roasted. Production of crude ammonium perrhenate salt was started in 1955. In the late 1950s, The Anaconda Company analyzed the dust from operations in Chuquicamata (Chile) an a El Salvador, however, no steps were taken to recover rhenium.

At about the same time, work was started at Chase Brass & Copper Company, a subsidiary of Kennecott, on the processing of crude rhenium salts to a high purity metal powder and on the development of fabrication procedures for rhenium and rhenium alloys. By 1961 this operation had grown to the point where Chase established a separate Rhenium Division with capabilities for producing rhenium salts, metal powder, and wrought rhenium and rhenium alloy products in a wide variety of forms. In 1961 the S. Shattuck Chemical Company was also licensed to recover crude rhenium salts for Chase from their molybdenite roasting operation. Chase produced about 600 kg in 1963.

The largest world reserves of rhenium are located in Chile; which is today the world's largest producer. Other producers include Germany, Commonwealth of Independent States, Sweden, the United States and Japan. In Germany, rhenium is obtained from molybdenum concentrates, spent catalysts, and rhenium-containing scrap, and processed to produce high-purity NH4ReO4, HReO4, and Re metal powder or pellets. The largest consumer of rhenium is the United States, which imported ca. 15 t of rhenium in 1990. Rhenium is used for aircraft turbine blades (60%), reforming catalysts (30%), and other applications (10%).

MOLYMET production facilities are located in Chile, Mexico, Germany and Belgium. The main production complex is located in Nos, a small town about 30 Km south of Santiago, Chile. At this plant, molybdenum concentrates are roasted to produce technical molybdenum oxide, molybdenum oxide briquettes, ferromolybdenum, high purity molybdenum chemicals, and all the rhenium products. Roasting capacity at this location is approximately 43 000 tonnes of concentrates per year, distributed in three roaster furnaces. Output gases from the furnaces are cleaned in a scrubbing plant and then converted to sulfuric acid, which is sold in the domestic market. This complex is also equipped with a leaching plant, which allows the removal copper from the products. The copper is then recovered at an electrowinning plant as high quality copper cathodes.

The Cumpas Plant is located in Cumpas, State of Sonora, Mexico. The plant is run by the Mexican subsidiary Molymex. This site roasts molybdenum concentrates, mainly from Mexican or North American origin, to produce molybdenum oxide. The current installed capacity is approximately 18 500 tonnes of concentrates. Output gases from the roasting process are cleaned by a scrubbing plant and then fed to a sulfuric acid plant. There, the gases are converted to sulfuric acid, a product that is sold in the domestic Mexican market.

The Bitterfeld Plant is located in Bitterfeld, Sachsen-Anhalt, Germany, about 30 Km. north of Leipzig and within the Bitterfeld Chemiepark, a chemical complex created during the former German Democratic Republic. It is run by the German subsidiary CM Chemiemetall GmbH. The site produces metallic powder, through direct reduction of oxides with hydrogen. There are two separate plants, one for molybdenum powders production and the other for tungsten powders production. It also produces small amounts of sodium molybdate. The main market for this facilities products are the steel and superalloys industries in Europe.

The Ghent Plant is located in Ghent, Belgium. This facility roast molybdenum concentrates to produce technical molybdenum oxide, molybdenum oxide briquettes, ferromolybdenum and sodium molybdate the roasting capacity at this location is approximately 18 500 tonnes of concentrates. The roasting plant is complemented by gas cleaning systems, similar to the other roasting sites, including the scrubbing plant and the sulfuric acid production plant. Output products from this complex are mainly oriented to the European steel industry.

PROPERTIES OF RHENIUM

Having a melting point of 3180 ºC, it is the highest melting metal next to tungsten (3380 ºC). It has also a high specific gravity (21,4) next only to Os, Ir, and Pt. Its characteristic valence stage is 7 but it can also form compounds with valency -1, 1, 2, 4, 5 and 6. While similar in many respects to other refractory metals, rhenium's unusual combination of properties from both a chemical and metallurgical point of view makes it unique even among its close relatives. For example, it is the only refractory metal which does not form carbides. Rhenium has an hexagonal close-packed structure which it retains to its melting point and hence does not undergo a ductile-brittle transformation, in contrast to other refractory metals.

Rhenium has very high strength at high temperature, as well as extremely good ductility and cold working properties. It is therefore a very useful high-temperature material. Rhenium is a very heat-resistance metal, provided it does not come in contact with oxidizing agents. It is practically insoluble in hydrochloric and hydrofluoric acids. In oxidizing acids, it dissolves to form perrhenic acid. It also forms volatile oxides with oxygen at high temperature. In air at 350 ºC, the heptoxide, Re_2O_7, is formed. The stability of rhenium metal components is limited due to oxide formation. When rhenium is heated with fluorine or chlorine, the fluorides or chlorides are formed. Rhenium reacts with silicon, boron, and phosphorus at elevated temperature to form silicides, borides, and phosphides, respectively.

When rhenium is used as an alloying component with the metals tungsten and molybdenum, which are difficult to work, ductility and strength are improved. This is caused by alloy softening, which is defined as the reduction in the yield stress or hardness at low temperatures. This effect is observed especially in body-centered cubic alloys. In addition to the improvement in ductility at low temperatures, the strength at high temperature increases. Tungsten - rhenium alloys containing 25-30% Re have good cold ductility. Rhenium is soluble in tungsten, its solubility reaching 28% at 1600 ºC and 37% at 3000 ºC. Tungsten is also soluble in rhenium: 11% at 1600 ºC and 20% at 2825 ºC.

The addition 1-3% Re to a nickel-base alloy improves its toughness at high temperature and prevents fatigue fracture. Such alloys are used mainly in the production of aircraft turbine blades. They are mono-crystalline and have high strength and resistance to oxidation. When these turbine blades are used in the hot zones of an engine, the operating temperature can be increased, giving higher efficiency (lower fuel consumption). Rhenium in the form of powdered metal or pellets is incorporated into alloys by various methods. The W-Re and Mo-Re alloys are used mainly in the manufacture of thermo-elements. Other uses include semiconductors, heating elements, electrical and electronic applications, high-temperature welding rods, and metallic coatings. Tungsten-rhenium alloys (W5Re, W10Re) are also used in the manufacture of rotating X-ray anodes.

Rhenium forms three stable oxides Re_2O_7, ReO_3, and ReO_2 of which the first is the most important. It is a bright yellow volatile solid, (b.p. 3631°C) dissolves in water to form rhenic acid, $HReO_4$. Manganese and molybdenum oxides on the other hand, are insoluble, they are formed by the oxidation of the metal or its sulfide (ReS_2). Rhenium disulfide is hexagonal like MoS_2. It is a black dense solid (density 7,5), oxidizes by nitric acid and H_2O_2 to form an $HReO_4$ solution. Rhenium heptasulfide, Re_2S_7, is a dark brown substance, precipitated by H_2S from both acid and alkaline solutions of rhenium; it is sparingly soluble in solutions of alkali metal sulfides. In this respect it is similar to molybdenum sulfide but different from MnS which is soluble in dilute acid. Rhenium chloride, ReC_{13}, is reddish black, m.p. 730 °C but sublimes at 500-550 °C. The pentachloride, ReC_{15}, is dark brown, m.p. 260 °C, b.p. 330 °C, fumes in air as a result of hydrolysis, and dissociates at 260 °C to form $ReCl_3$. Two oxychlorides $ReOC_{14}$ and ReO_3C_1 are also known.

USES

Rhenium is highly desirable as an alloying addition with other refractory metals. The addition of rhenium greatly enhances the ductility and tensile strength of these metals and their alloys, even after heating above the re-crystallization temperature. A prime example is the complete ductility exhibited by a Mo-Re fusion weld. Rhenium alloys are gaining acceptance in nuclear reactors, semiconductors, electronic-tube components, thermocouples, gyroscopes, miniature rockets, electrical contacts, thermionic converters, and other commercial and aerospace applications. Tungsten-rhenium alloys are used to surface molybdenum targets in X-ray tube manufacture. Other rhenium alloys (with tungsten or molybdenum) are used for filaments, grid heaters, cathode cups, and ignitor wires in photo-flash bulbs.

However the most important use of rhenium is as a catalyst for reforming in conjunction with platinum, in selective hydrogenation, and in other chemical reactions. The most common processes in which it is used or has been tested and used as a catalyst include alkylation, de-alkylation, de-hydrochlorination, de-hydrogenation, de-hydroisomerization, hydrocracking, hydrogenation, oxidation, and reforming. The outstanding property of rhenium catalysts is their high selectivity, particularly in hydrogenation reactions. It also displays unusually high resistance to such catalyst poisons as nitrogen, sulfur, and phosphorus.

Rhenium is not attacked by molten copper, silver, tin, and zinc. It dissolves readily in molten iron and nickel and it is stable in contact with aluminum. At elevated temperatures, rhenium stands up well in hydrogen and inert atmospheres. It is resistant to hydrochloric acid and shows good resistance to salt water corrosion and the mechanical effects of electrical erosion.

RADIOACTIVE RHENIUM

There are 41 osmium isotopes with mass numbers from 162 to 196 and the majority are unstable. Only seven stable osmium isotopes occur naturally; these are the ones with mass numbers 184, 186, 187, 188, 189, 190 and 192. Their abundance varies and they differ in some of their nuclear characteristics. Osmium isotopes naturally formed as a result of two different processes. Isotopes 184, 186, 188, 189, 190, 192 and a portion of 187 originated during the initial nucleo-synthesis of elements. Another portion of isotope 187Os originated as a result of ß disintegration of one of the rhenium isotopes (half life 4,3 x 1010 years) according to:

$$^{187}_{75}\mathrm{Re} \rightarrow {}^{187}_{76}\mathrm{Os} + ß^{-} + \bar{\nu}$$

where $\bar{\nu}$ is ß disintegration anti-neutrino. This process is continuous and has resulted in the gradual accumulation of the radiogenic osmium isotope 187, especially in natural materials having high rhenium content. As a consequence, the proportion between 187Os and the other osmium isotopes varies over a wide range.

Researchers in Kazakhstan have developed a set of analytical techniques, including the direct quantitative determination of osmium in ores and process products, a highly sensitive spectrochemical analysis of source materials and isotopic analysis of osmium in concentrated samples. The techniques make use of high-resolution spectroscopic equipment, as well as an appropriate consideration of physical and chemical properties of osmium and its spectral features. The following major types of deposits where osmium isotopes are concentrated have been identified as follows:

- Platinum ore and osmiridium deposits. The proportion of 187Os relative to the total amount of osmium ranges from 1,4 to 1,7 %. The major isotope present is 192Os. Isotopes 192Os, 190Os and 188Os are also present.

- Sulfide deposits of copper-nickel and other ores enriched in platinum elements where the isotopes 187Os are found in concentrations of 2 to 3 % and higher.

- Copper-molybdenum deposits in secondary quartz rocks with rhenium content in molybdenites of 300 to 3000 ppm. Usually these ores contain only insignificant concentrations of non-radiogenic osmium isotopes. However, they do contain practically pure 187Os, in the range 99,0 to 99,9 % of the total osmium content. Some rhenium-containing copper deposits such as copper-bearing sandstones and shale, where the content of radiogenic osmium-187 (in the osmium identified) is higher than 99,4%.

The technical feasibility of producing natural stable radiogenic osmium-187 isotope from rhenium-containing raw materials available in Kazakhstan has been demonstrated. The research performed suggests that osmium-187 could be produced in larger quantities and with higher purity than physical methods of separation allow.

HISTORICAL

The search for the missing elements which were predicted by Dimitri Mendeleev (1834-1907) between 1869 and 1891 was intensive especially when the prediction came true after the discovery of gallium, scandium, and germanium between 1875 and 1886. In 1901 Bohuslav Brauner (1855-1935) in Prague

predicted the existence of an element between neodymium and samarium. This was confirmed in 1914 by Moseley and became known as element 61. In 1918 Otto Hahn and Lisa Meitner in Berlin discovered protactinium, and in 1923 Georg von Hevesy and Dirk Coster in Copenhagen discovered hafnium after Niels Bohr had confirmed a year earlier from theoretical considerations that lutetium was a rare earth and not a member of Group IV of the Periodic Table as was originally thought, thus proposing the search for a missing element in zirconium minerals.

The scientific career of Ida Noddack (1896-1978) (Figure 2) was centered around an intensive study of the Periodic Table. She realized that the missing element dvi-manganese should have properties similar to its neighbours in the horizontal period of the Periodic Table and not to members of the vertical group of which manganese was the only member known. In this way she was able to look for and discover the metal rhenium.

Figure 2. Ida Noddack (1896-1978), the co-discoverer of rhenium in her laboratory

When Ida Noddack discovered rhenium in 1925, the electronic structure of the transition metals, as well as that of the lanthanides, became known only few years earlier by Niels Bohr (1885-1962). The actinides were not discovered yet. In the Periodic Table of that era thorium was considered to be in Group 4 under titanium, and uranium in Group 6 under chromium (Table 1).

Manganese, the ninth most abundant metal in nature, with a relative abundance of about 0.1% in the Earth's crust, was in Group 7. Mendeleev left two gaps below it, which he marked eka-manganese (Em) and dvi-manganese (Dm). He predicted new elements to fill these and other gaps he left in his Table. In his prediction of the existence of the three elements eka-boron, eka-aluminum, and eka-silicon, he was able to describe their properties with fairly accurately by interpolation. This facilitated greatly the work of chemists after him because they knew for what they were looking for. Hence, gallium and germanium were discovered within 10 years of Mendeleev's prediction. When, however, he predicted eka-manganese and dvi-manganese, he was unable to predict much of their properties because they couldn't he interpolated; they were the last two members of the group. For Em he predicted an atomic weight of 100, and for Dm 190; values that are very near to the actual values of 98 and 182,2, respectively. He also predicted that their compounds would be colored and that there would be a series of oxides corresponding to the oxides of manganese. These gaps remained unfilled for more than 50 years.

In their search for the two missing elements of the manganese group, Ida Tacke and her future husband, Walter Noddack, came to the conclusion from the very beginning, that these elements must have properties different from manganese and should be similar to their horizontally - occurring neighbors. They came to the early conclusion that elements 43 and 75 should have

							H										
						He	Li	Be	B	C	N	O	F				
						Ne	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl				
A	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br
Kr	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	43	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I
Xe	Cs	Ba	La	Ce	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
–	–	–	–	–	Ta	W	75	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	–	–
Rn	–	Ra	–	Th	–	U		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Table 1. The Periodic Table as given by Ida Noddack in 1925

abundance as ruthenium and osmium respectively in analogy to the similarity in the relative abundance of manganese to its neighbour iron (Table 2). This proved to be quite accurate. Thus, the two elements Em and Dm are extremely rare as compared to manganese and further, technetium has properties very similar to rhenium and not to manganese. Rhenium occurs in molybdenum ores and not with manganese ores.

Ida Noddack decided to investigate the mystery of these two missing elements with her husband future. They made a tedious and systematic study of properties of the elements near these two gaps. They found that, although usually there was a gradual change in properties in the vertical groups, there were also sharp changes. From comparisons with other groups, they concluded that such sharp changes would occur between manganese and the two elements below it. For example, they believed that the sulfides of the missing elements would be insoluble in dilute acid in contrast to manganese disulfide, which is acid-soluble. This explains why previous investigators had failed to discover the missing elements because they were searching for them in manganese ores on the assumption that the missing elements would resemble manganese in chemical properties.

The Noddacks did not make this assumption; their research for the missing elements centred on ores containing minerals of the metals molybdenum, tungsten, ruthenium, and osmium, the horizontal neighbours of eka- and dvi-manganese. Their first concentration of the missing elements was through the elimination of iron and manganese from the samples by precipitation and filtration. They prepared more than 400 enriched products from different ores for examination.

The existence of the two missing elements was firmly confirmed by Henry Moseley (1887-1915) in his work when from 1912-14 he established the periodicity of the wave lengths of the X-ray emission lines of the elements and with his discovery of the atomic numbers of the elements. For example, he established that the atomic number of molybdenum was 42 and that of ruthenium was 44. Thus, it was shown that the space left in Mendeleev's Table for Em was real and that a definite element should occupy that space: element 43. It was that phenomenon of X-ray emission which Tacke and Noddack utilized as their main technique in looking for the unknown elements. In June 1925, with the help of Otto Berg, an X-ray specialist at Siemens-Halske in Berlin, they identified in a Norwegian columbite a new element which they called rhenium in honour of the River Rhine. A year later, after the discovery of rhenium, the Noddacks prepared the first gram of the metal from 660 kg of molybdenite ore and later wrote numerous papers on its chemistry. The extraction of rhenium was achieved after repeated separations of molybdenum as the phosphomolybdate and precipitation of rhenium as the sulfide. A relatively pure rhenium sulfide was obtained which was then reduced to the metal by hydrogen at 1000 °C.

Suggested readings

Z.S. Abisheva, A.N. Zagorognyaya, and T.N. Bukurov, "*Recovery of Radiogenic Osmium 187 from Sulfide Copper Ores in Kazakhstan*", Platinum Metals Rev. 45(3), 132 -135 (2001)

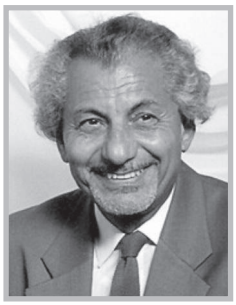
F. Habashi, Ida Noddack (1896–1978). "*Personal Recollections on the Occasion of 80th Anniversary of the Discovery of Rhenium*", Métallurgie Extractive Québec, Québec City, Canada 2005

Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As
	$2\cdot10^{-3}$	$3\cdot10^{-5}$	$3\cdot10^{-5}$	$7\cdot10^{-2}$	10^{-2}	$3\cdot10^{-6}$	$3\cdot10^{-5}$	10^{-7}	10^{-6}	10^{-9}		10^{-7}
Y	**Zr**	**Nb**	**Mo**	**43**	**Ru**	**Rh**	**Pd**	**Ag**	**Cd**	**In**	**Sn**	**Sb**
$1\cdot10^{-6}$	$6\cdot10^{-5}$	10^{-7}	10^{-7}	$\sim10^{-13}$	$2\cdot10^{-12}$	10^{-11}	10^{-11}	10^{-9}	10^{-8}	10^{-9}	$7\cdot10^{-6}$	$7\cdot10^{-8}$
La	**Hf**	**Ta**	**W**	**75**	**Os**	**Ir**	**Pt**	**Au**	**Hg**	**Tl**	**Pb**	**Bi**
$6\cdot10^{-7}$	$6\cdot10^{-6}$	$5\cdot10^{-7}$	$5\cdot10^{-7}$	$\sim10^{-12}$	$2\cdot10^{-11}$	$2\cdot10^{-11}$	10^{-9}	10^{-9}	10^{-9}	$4\cdot10^{-9}$	$4\cdot10^{-7}$	10^{-9}
	Th		**U**									
	$7\cdot10^{-8}$		$7\cdot10^{-8}$									

Table 2. Relative abundance of the elements in the Earth's crust as reported by W. Noddack and I. Tacke in 1925. It can be seen that they came to the early conclusion that elements 43 and 75 should have a similar abundance to ruthenium and osmium as manganese is similar to iron

H.-G. Nadler, "*Rhenium*" pp. 1491 - 1501 in volume 3, Handbook of Extractive Metallurgy, edited by F. Habashi, WILEY-VCH, Weinheim, Germany 1997

Author



Fathi Habashi, Professor Emeritus at Laval University in Quebec City. He holds a B.Sc. degree in Chemical Engineering from the University of Cairo, a Dr. techn. degree in Inorganic Chemical Technology from the University of Technology in Vienna, and Dr. Sc. honoris causa from the Saint Petersburg Mining Institute in Russia. He held the Canadian Government Scholarship at the Mines Branch in Ottawa, taught at Montana School of Mines then worked at the Extractive Metallurgical Research Department of Anaconda Company in Tucson, Arizona before joining Laval in 1970. His research was mainly directed towards organizing the unit operations in extractive metallurgy and putting them into a historical perspective.

Habashi has been guest professor at a number of foreign universities, authored a number of textbooks on extractive metallurgy and its history, and edited a Handbook of Extractive Metallurgy in 4 volumes in 1997. Some of his books were translated into Russian, Chinese, Vietnamese, and Farsi.

Original recibido: 16 de agosto de 2010
Aceptado para publicación: 30 de setiembre de 2010

Desinfección electroquímica de agua utilizando electrodos de SnO_2- Sb/Ti

Electrochemical water desinfection using SnO_2- Sb/Ti electrodes

Miguel Ponce, *Universidad Nacional de Ingeniería*

Resumen

En el presente trabajo se evalúa la actividad de los electrodos de dióxido de estaño dopado con antimonio, en la generación de especies oxidantes para la desinfección de agua que contiene *Eschirichia Coli* (E-Coli). Los electrodos de dióxido de estaño fueron preparados mediante descomposición térmica a partir de sales precursoras y caracterizados por DRX y voltametría cíclica. La capacidad biocida de las soluciones electro-oxidadas fue determinada mediante ensayos de crecimiento bacteriológico, Se consigue la completa eliminación de E-Coli utilizando agua electro-oxidada con una dilución de 1:100.

Abstract

This paper evaluates the antimony doped tin dioxide electrodes activity in the generation of oxidant species to disinfect water containing *Eschirichia Coli* (E. Coli). The electrodes were prepared by thermal decomposition and characterized by DRX and cyclic voltammetry. The bioxide capability of electro oxided solutions biocide capability was determined by bacteriological growing tests. We can get a total disinfection using electro oxided water with a 1: 100 dilution.

Palabras clave

Electro-oxidación, actividad electrocatalítica, voltametría cíclica.

Key words

Electro- oxidation, electrocatalytic activity, cyclic voltammetry.

INTRODUCCIÓN

El proceso de descontaminación y desinfección del agua, basado en principios electroquímicos, es considerado una de las técnicas más avanzadas para el tratamiento de efluentes acuosos. Las especies oxidantes son generadas *in situ*; su reacción con los contaminantes es estequiométrica, por lo que no deja residuos; y los productos son sustancias inocuas.

El material que se utiliza como ánodo en la celda es determinante en la eficiencia del proceso. La nueva generación de electrodos fabricados con óxidos metálicos ha suscitado especial interés por su alta actividad catalítica, que está relacionada con el empleo de una mayor carga eléctrica por unidad de área geométrica en los procesos de electro-oxidación.

FUNDAMENTOS

Electrodos de dióxido de estaño

Entre los principales electrodos que exhiben un alto sobrepotencial en la formación de oxígeno tenemos al PbO_2, SnO_2 dopado con Sb (SnO_2-Sb), diamante dopado con boro (BDD) y TiO_2 dopado con Nb (TiO_2-Nb). De los cuatro materiales mencionados, PbO_2 y SnO_2-Sb son relativamente baratos y de fácil preparación. El SnO_2-Sb ha probado ser muy efectivo en la mineralización de muchos compuestos orgánicos como fenol, bisfenol y anilina [1].

La oxidación anódica de contaminantes con electrodos basados en SnO_2 presenta una eficiencia en corriente 5 veces mayor que la obtenida con platino. Se ha demostrado que, en la oxidación anódica de fenol, los electrodos basados en SnO_2 muestran mejores resultados que electrodos de PbO_2, IrO_2, RuO_2 o Pt [2].

El óxido de estaño es un material semiconductor tipo n, con gran estabilidad química y mecánica. Presenta propiedades que lo hacen útil como material para sensores de gas, catalizadores, electrodos catalíticos, celdas fotovoltaicas, etc. El método de síntesis, para lo obtención del óxido de estaño, tiene un gran efecto sobre el tamaño de partícula, la morfología de la misma y sus propiedades semiconductoras [3].

La actividad electrocatalítica y la estabilidad mecánica de los electrodos de Ti/SnO_2 pueden ser incrementadas dopando el

material. Se han utilizado como dopantes Sb, Fe, F, Pt y Ni; y es con antimonio que se han conseguido mejores resultados. La cantidad adecuada de antimonio como dopante oscila entre 1,5 y 15 % [4].

METODOLOGÍA

Preparación de electrodos de SnO_2/Ti y de SnO_2-Sb/Ti

La preparación de los electrodos de dióxido de estaño se llevó a cabo mediante descomposición térmica, una técnica sencilla que nos permite obtener electrodos de múltiples óxidos con actividad electrocatalítica [5].

Se empleó como soporte una lámina de titanio de 0,5 cm x 6 cm. Esta fue desengrasada con acetona y posteriormente atacada con una disolución de ácido oxálico al 10 % a ebullición durante una hora. El tratamiento produjo una superficie rugosa apropiada para la adhesión de los óxidos.

La mezcla precursora fue preparada disolviendo $SnCl_4.5H_2O$ en etanol hasta alcanzar una concentración 0,5 M. Esta disolución fue aplicada con una brocha en la superficie del soporte. Las etapas fueron las siguientes:

- Impregnación de la disolución.
- Secado en estufa a 90 °C por 5 minutos.
- Tratamiento térmico a 400 °C por 10 minutos.
- Enfriado y repetición de todo el proceso.

Culminada la aplicación de 12 capas, según los pasos descritos anteriormente, se realizó un tratamiento térmico final a 400 °C con la finalidad de lograr la sinterización homogénea de los óxidos.

En la preparación del electrodo de dióxido de estaño dopado con antimonio se utilizó una disolución precursora que contiene $SnCl_4.5H_2O$ 0,5 M y $SbCl_3$ 0,05 M.

Los electrodos preparados presentan en promedio 5 mg/cm^2 de recubrimiento. El Difractograma del electrodo de SnO_2-Sb/ Ti con los respectivos patrones de difracción se presenta en figura 1. El DRX fue realizado con un equipo marca Bruker AXS Serie D8 Advance con fuente de radiación Cu Ka y longitud de onda de 1,54178 Å. Los patrones fueron relacionados con los picos espectrales utilizando el programa MATCH.

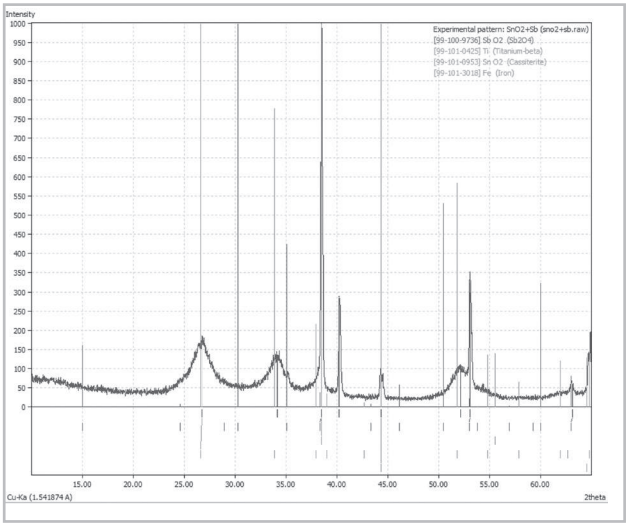


Figura 1. DRX del electrodo de SnO_2- Sb/Ti (●)y los respectivos patrones de difracción.

Voltametría cíclica [5]

Dentro de las diferentes técnicas electroquímicas, la voltametría cíclica se presenta como una técnica versátil y altamente sensible, apropiada para el estudio del comportamiento de la interfase electrodo-disolución. Mediante esta técnica, se obtiene información sobre los cambios de los estados de oxidación de las especies que conforman el electrodo y las especies electroactivas que se encuentran en su superficie. El voltagrama es una representación gráfica potencial-corriente que se obtiene polarizando el electrodo de trabajo (ET) frente a un electrodo de referencia mediante un generador de señales y un potenciostato. La polarización del electrodo se impone mediante el potenciostato desde un valor de potencial inicial a otro final incrementando su valor a una determinada velocidad de barrido, después del cual el sentido del barrido se invierte completando el ciclo. La diferencia de potencial entre el ET y el electrodo de referencia (ER) condiciona el flujo de una corriente entre el ET y el contraelectrodo (CE) para compensar las cargas, la corriente que circula en la celda se registra como respuesta y está relacionada con las características propias de la interfase, electrodo y disolución.

El sistema básico que se presenta en la figura 2 es utilizado para efectuar estudios voltamétricos y está conformado de los siguientes componentes:

- Una célula electroquímica confeccionada en vidrio borosilicato habilitada con una entrada para gas inerte, capilar de Luggin para el ER, entradas para el CE y el ET.
- Un generador de señales.

- Un potenciostato.
- Un registrador o sistema de conversión para la visualización del voltagrama y captura de datos en tiempo real.

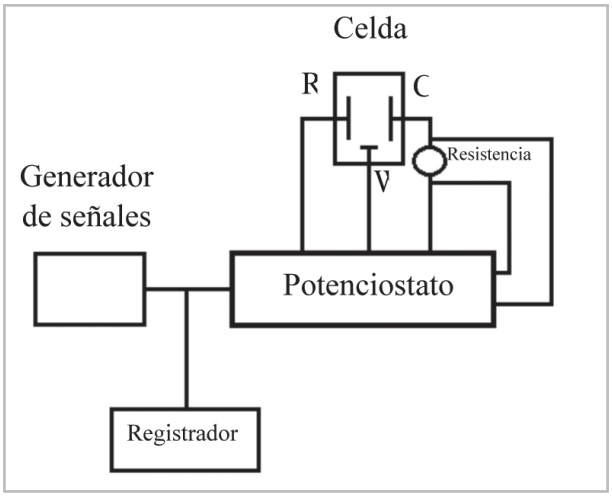


Figura 2. Diagrama de un sistema de voltametría cíclica.

El potenciostato utilizado es el Autolab PGSTAT12 implementado con SCAN-GEN para la obtención de barridos de potencial analógico, del Laboratorio de Electroquímica Aplicada de la Universidad Nacional de Ingeniería. En todas las pruebas voltamétricas se utilizó un electrodo de referencia de Ag / AgCl y un contraelectrodo de platino.

RESULTADOS

Voltametrías cíclicas de los electrodos de SnO_2/Ti y de SnO_2-Sb/Ti

Electrodo de SnO_2/Ti

En la figura 3 se observa el voltagrama del electrodo de SnO_2/Ti, en H_2SO_4 0,5 M en el cual podemos notar el perfil característico de un semiconductor tipo n; esto es, una región inicialmente ancha, que se torna delgada a potenciales más positivos. Además, el voltagrama nos revela que a potenciales superiores a 2,25 V, aparece un pequeño aumento de corriente que podemos asociar a la reacción de desprendimiento de oxígeno. La corriente de desprendimiento de hidrógeno aparece a potenciales menores a 0,5 V.

En la figura 4, podemos observar la respuesta voltamétrica del electrodo de SnO_2 frente al par Fe3+/Fe2+. Este voltagrama nos demuestra que el electrodo de SnO_2 permite la transferencia de electrones en su superficie.

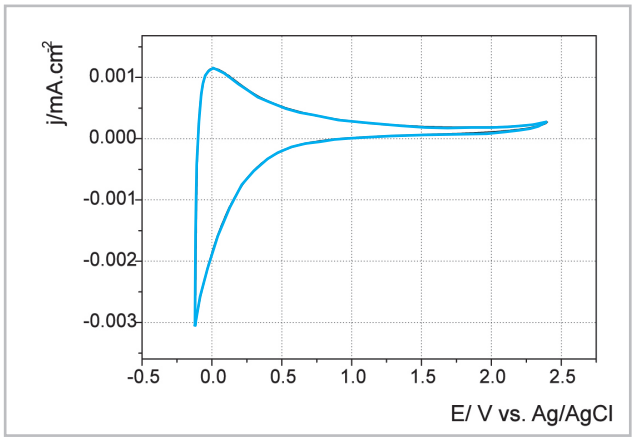


Figura 3. Voltagrama estabilizado del electrodo de SnO_2/Ti en H_2SO_4 0,5 M con una velocidad de barrido de 50 mV/s.

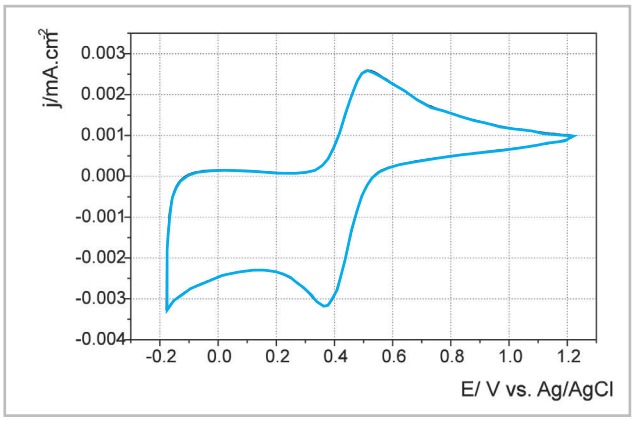


Figura 4. Voltagrama estabilizado del electrodo de SnO_2/Ti en H_2SO_4 0,5 M y $FeSO_4$ 0,01 M; con una velocidad de barrido de 50 mV/s.

Electrodo de SnO_2-Sb/Ti

En la figura 5 podemos observar el voltagrama del electrodo de SnO_2-Sb/Ti, en H_2SO_4 0,5 M. La corriente anódica que asociamos al desprendimiento de oxígeno aparece esta vez a 2,0 V; en tanto que, a potenciales menores a 0,25 V, apreciamos la corriente de desprendimiento de hidrógeno.

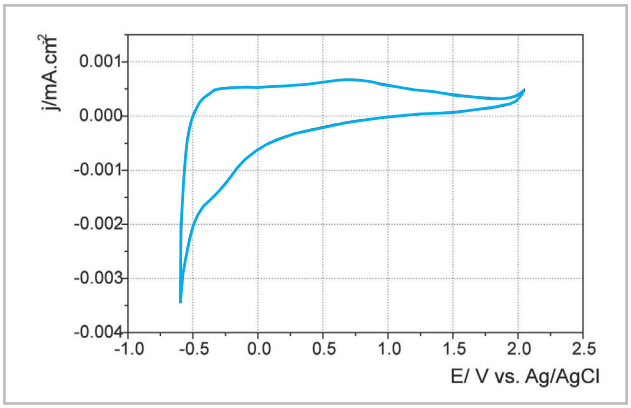


Figura 5. Voltagrama estabilizado del electrodo de SnO_2-Sb/Ti en H_2SO_4 0,5 M con una velocidad de barrido de 50 mV/s.

En la figura 6 vemos que el SnO_2-Sb/Ti presenta una buena respuesta electroquímica frente al Fe_2+/Fe_3+, esto evidencia una buena actividad rédox del material.

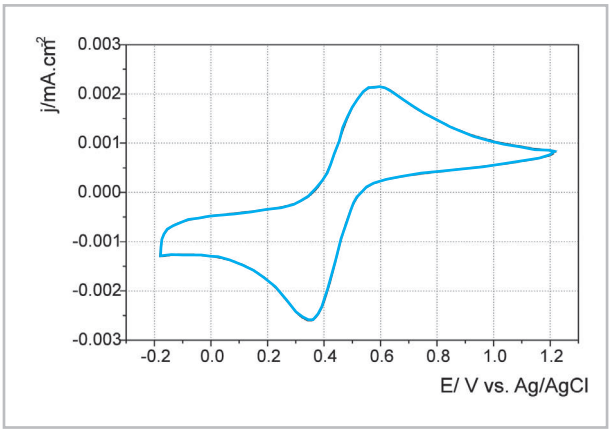


Figura 6. Voltagrama estabilizado del electrodo de SnO_2-Sb/Ti en H_2SO_4 0,5 M con $K_4Fe(CN)_6.3H_2O$ 0,001 M y $K_3[Fe(CN)_6]$ 0,001 M; la velocidad de barrido es 50 mV/s.

En la figura 7 comparamos los voltagramas de SnO_2/Ti y SnO_2-Sb/Ti. Podemos concluir que el SnO_2-Sb/Ti tiene una menor polarización en la formación de oxígeno y una mayor polarización en la formación de hidrógeno, que el electrodo sin dopar.

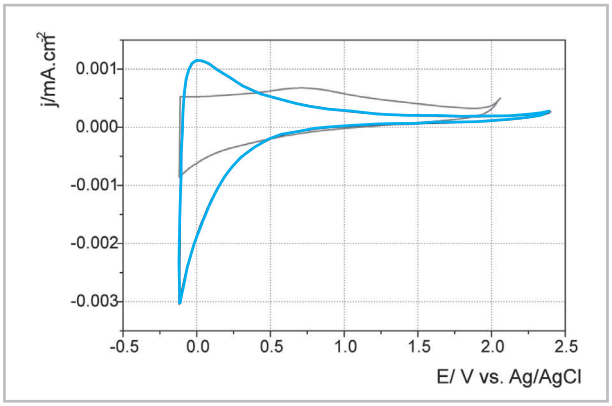


Figura 7. Voltagramas de los electrodos de SnO_2/Ti (■) y de SnO_2-Sb/Ti (■) en H_2SO_4 0,5 M con una velocidad de barrido de 50 mV/s.

Prueba de ORP con el electrodo de SnO_2-Sb/Ti

El electrodo ORP es un dispositivo que nos permite determinar la cantidad de especies oxidantes presentes en una disolución, aun cuando no es posible identificar, mediante este método, el tipo de especies oxidantes. El electrodo ORP está compuesto por un electrodo de platino y un electrodo de referencia de Ag/AgCl en una disolución de KCl 3,5 M saturada con AgCl. El equipo mide la diferencia de potencial entre el electrodo de Pt y el electrodo de referencia [7].

Se lleva a cabo una electrólisis durante 10 minutos en una disolución de NaCl 2% con una densidad de corriente de 5 mA/cm² a pH 6. Se toman porciones de 50 µL y se agregan a una disolución buffer con pH 6 en la cual está sumergido un electrodo ORP.

Las reacciones que se llevan a cabo en la celda se presentan a continuación:

Ánodo: $2Cl^- \longrightarrow Cl_2 + 2e^-$ $\quad E^\circ_{ox} = -1{,}36$ V

$H_2O \longrightarrow 1/2\ O_2 + 2H^+ + 2e^-$ $\quad E^\circ_{ox} = -1{,}23$ V

Cátodo: $2H_2O + 2e^- \longrightarrow 2OH^- + H_2$ $\quad E^\circ_{red} = -0{,}83$ V

Reacción química entre los productos:

$$Cl_2 + 2OH^- \longrightarrow Cl^- + OCl^- + H_2O$$

En la figura 8 podemos observar que el electrodo de SnO2-Sb/Ti genera especies oxidantes (aniones hipoclorito). Esto lo hace un buen candidato a ánodo en una celda para descontaminación de aguas.

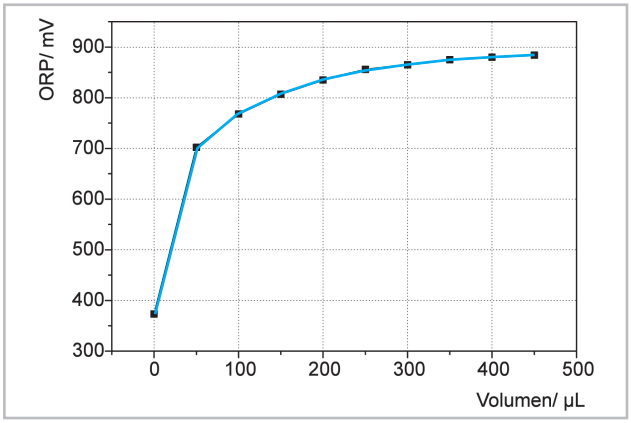


Figura 8. ORP de una disolución de NaCl 2% utilizando como ánodo SnO_2-Sb/Ti. La densidad de corriente es 5 mA/cm².

En la figura 9 observamos el voltagrama estabilizado del electrodo de SnO_2-Sb/Ti antes y después de agregar NaCl 0,5 M. El pico de oxidación que inicialmente aparecía a 1,45 V; se observa ahora a 1,25 V. Podríamos atribuir esto al hecho de que la corriente de oxidación corresponde, ya no solamente a la formación de oxígeno, sino a la formación de cloro y de oxígeno, dos procesos que ocurren simultáneamente y en competencia en el ánodo.

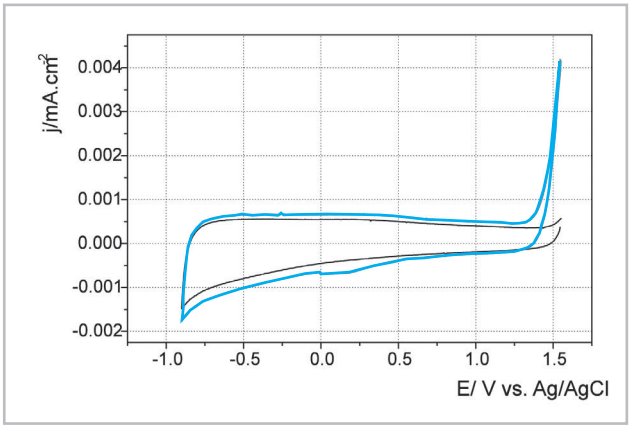


Figura 9. Voltagramas del electrodo de SnO_2-Sb/Ti en H_2SO_4 0,5 M antes (■) y después (■) de agregar NaCl 0,5M. La velocidad de barrido es 50 mV/s.

Análisis de la capacidad biocida de las soluciones electro-oxidadas

Para el análisis se utilizó bacterias *Escherichia Coli* cepa ATCC 25922, las cuales fueron sembradas en caldo nutritivo (cultivo madre), marca Merck. La composición se establece de acuerdo a la tabla 1.

Tabla 1. Composición del caldo nutritivo del cultivo madre

Composición	Concentración
Gelatin peptone	5,0 g/L
Beef extract	3,0 g/L

La preparación se realiza colocando una colonia de E. Coli ATCC25922 en agitación por un tiempo de 18 horas a 100 rpm, a temperatura ambiente (28 ºC). La cepa empleada se mantuvo con vida durante 5 días en agua.

Para evitar la interferencia con la solución de agua electro-oxidada las bacterias utilizadas para el ensayo son previamente filtradas con el uso de membranas millipore de tamaño de poro 0,45 µm. Después del filtrado la membrana es colocada en un matraz con 50 mL de agua destilada estéril. Se agita para lavar el filtro y desprender las bacterias en el agua esterilizada. El proceso se realiza en una cabina de flujo laminar.

Un volumen de 1 mL de agua electro-oxidada, generada en la celda con NaCl al 2% es diluido hasta 100 mL. Una porción de 1 mL de esta disolución es agregada a la placa Petri. Después de 20 minutos se realiza el recuento de bacterias y se compara con una placa de control preparada siguiendo la misma relación de concentración de componentes, pero a la cual se le agrega agua sin electrolizar. Los resultados se presentan en la figura 10.

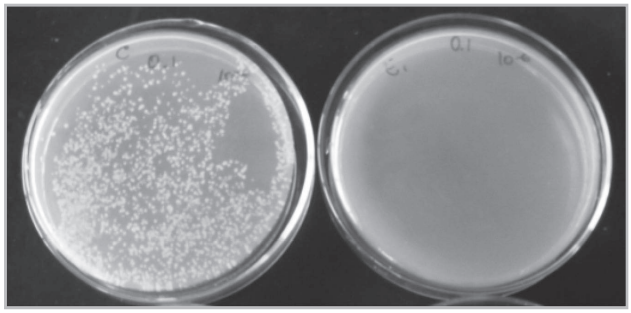


Figura 10. Placas Petri con el sembrado de bacterias E.Coli después de 24 horas de crecimiento a 37 ºC, con relación de dilución 1:100. a) Placa de control con agua sin electrolizar b) Con agua electro- oxidada utilizando SnO_2- Sb/Ti.

Podemos observar que después de agregar la disolución todas las cepas han desaparecido. Los ensayos bacteriológicos son concluyentes en lo que respecta al buen comportamiento del electrodo SnO2- Sb/Ti, que consigue eliminar completamente las bacterias E. Coli con una dilución de 1:100.

El cloruro de sodio utilizado (NaCl 2%), queda reducido a 0,002% en la dilución a 100 veces, siendo imperceptible su sabor a esta concentración.

CONCLUSIONES

Se han preparado y caracterizado electrodos de dióxido de estaño dopado con antimonio soportado sobre titanio.

Los electrodos son capaces de generar especies oxidantes en una disolución de NaCl al 2%, como se evidencia en la prueba ORP.

El agua electro-oxidada diluida en una relación 1:100 exhibe una alta eficiencia en la descontaminación de agua que contiene la bacteria E. Coli.

REFERENCIAS

[1] MAO, X.; TIAN, F.; GAN, F.; LIN, A.; ZHANG, X. "Comparison of the performances of Ti/SnO–Sb, Ti/SnO–Sb/PbO and Nb/BDD anodes on electrochemical degradation of azo dye". *Russian Journal of Electrochemistry 2008*, Vol. 44, No. 7, pp. 802–811.

[2] PAO, P.; CHEN, X.; WU, H.; WANG, D. "Active Ti/SnO2 anodes for pollutants oxidation prepared using chemical vapor deposition". *Surface & Coatings Technology 202*, 2008, pp. 3850- 3855.

[3] MONTENEGRO, A. et. al. "Respuesta eléctrica de películas gruesas del sistema SnO2-TiO2, conformadas con polvos cerámicos obtenidos a través del método Pechini". *Boletín de la sociedad Española de Cerámica y Vidrio* N.° 46, 2007, pp. 316- 321.

[4] JIANG-TAO, K. et. al. "Effect of Sb dopant amount on the structure and electrocatalytic capability of Ti/Sb-SnO2 electrodes in the oxidation of 4-chlorophenol". *Journal of Environmental Sciences 19*, 2007, pp. 1380–1386.

[5] LA ROSA TORO, A; PONCE VARGA, M. "Evaluación de electrodos de espinela de cobalto y de dióxido de plomo en la oxidación electroquímica de colorantes azo". *Revista de la Sociedad Química del Perú*. Vol 73, Nº 4, 2007, pp. 183- 196.

[6] ZOSKI, Cynthia G. *The Handbook of Electrochemistry*, Elsevier Radarweg 29, First edition, 2007.

[7] LONGLEY, K.E. *Wastewater disinfection, manuals of practice for toilets pollution control*. Toilets Pollution Control Federation, Alexandria, 1986, USA.

ACERCA DEL AUTOR

Miguel Ponce Vargas es Licenciado en Química por la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) y cursa estudios de Maestría en dicha Universidad. Forma parte del Grupo de Investigación de Electroquímica Aplicada de la UNI. Actualmente se desempeña como profesor en TECSUP y en la Facultad de Ciencias de la UNI. Es el primer peruano en ser admitido en la Escuela de Electroquímica de la Universidad de Sao Paulo. Sus últimos trabajos de investigación están orientados a la descontaminación de aguas residuales textiles, además ha sido admitido en el Doctorado Físico Químico Molecular en la Universidad Andrés Bello que iniciará en Marzo del 2011.

Agradecimientos

El autor agradece al Dr. Adolfo La Rosa Toro Gómez, Director del Grupo de Investigación de Electroquímica Aplicada de la UNI, por su colaboración en el uso de equipos y materiales en el presente proyecto.

Original recibido: 30 de setiembre de 2010
Aceptado para publicación: 29 de octubre de 2010

Simulación del control predictivo de un motor Utilizando Java Tiempo Real

Predictive Control Simulation of a Motor Using Real Time Java

Renatto Gonzales, *Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas*

Resumen

En el control automático, poder realizar control a distancia es un requerimiento común en la industria. El empleo de redes de datos se hace cada vez más común, permitiendo el despliegue de redes de control con mayor flexibilidad. En este trabajo se pretende estudiar el control a distancia de un motor, utilizando como plataforma de comunicación las redes de datos.

Para realizar las pruebas de control a distancia del motor se han modelado matemáticamente un motor y un controlador en lazo cerrado. Estos modelos matemáticos serán programados utilizando Java Real Time para desplegar un ambiente simulado. Dentro de este ambiente se han realizado tres series de pruebas: la primera serie es el control local del motor. Aquí se verifica la operación de los modelos matemáticos. La segunda serie de pruebas simula el control remoto del motor a través de redes de conmutación de paquetes sin utilizar control predictivo. Y, finalmente, la tercera serie aplica el control predictivo al modelo de control remoto del motor.

Este trabajo nos ha permitido concluir que intentar controlar un proceso a través de una red de conmutación de paquetes presenta sus propios retos y dificultades, entre ellos destacan el retardo y las pérdidas de paquetes causados por colisiones, disponibilidad de ancho de banda entre otros. El control predictivo, por lo tanto, garantiza que el motor reciba un conjunto de comandos que ira utilizando hasta que se recupere la conectividad en el enlace.

Abstract

In automatic control, to perform remote control is a common requirement in the industry. The use of data networks is becoming increasingly common, allowing the deployment of control networks with greater flexibility. This paper aims to study the remote control of a motor, using data networks as communication platform.

For testing the remote control of the motor both mathematical models, the motor and a closed loop controller are developed. These mathematical models are programmed using Real Time Java to set a simulated environment. Within this environment there have been three series of tests: the first series is the local control of the motor. This is performed to verify the proper operation of mathematical models and setup a baseline of parameters. The second test simulates the remote control motor through packet switched networks without using predictive control. And finally the third set of tests applies the predictive control to the remote control model of the motor.

This paper has allowed us to conclude that attempting to control a process through a data network presents its own challenges and difficulties, including the delay and packet losses caused by collisions and availability of bandwidth among others. The predictive control thus ensures that you receive a set of motor commands that it will use until the link recovers network connectivity.

Palabras clave

Control predictivo, tiempo real, control de motores, Java Tiempo Real.

Key words

Predictive Control, Real Time, Motor Control, Real Time Java

INTRODUCCIÓN

Los entornos en que es necesario aplicar control automático no siempre están dentro de áreas geográficas reducidas donde todos los elementos, sensores, controladores y actuadores se encuentran próximos unos de otros. En muchos casos estos dispositivos se encuentran distribuidos en áreas geográficas extensas, donde la necesidad de comunicación es cubierta muchas veces por redes de datos. Las redes de datos utilizan técnicas de conmutación de paquetes que, entre sus principales ca-

racterísticas, incluye la pérdida de paquetes y las limitaciones de ancho de banda. Por tal motivo, es frecuente encontrarnos con problemas de pérdida de paquetes, así como problemas de retardo; lo que causa que los comandos enviados del controlador hacia el actuador se pierdan o no lleguen a tiempo.

Lo mencionado anteriormente nos trae la necesidad de utilizar técnicas en tiempo real que garanticen la llegada y ejecución de las órdenes de control enviadas a los actuadores remotos a través de una red de conmutación de paquetes. Dentro de este entorno, el objetivo del estudio es buscar una alternativa que permita garantizar la ejecución de las órdenes de control enviadas del controlador al actuador, a través de una red de conmutación de paquetes. En los casos de pérdidas de comandos se debe garantizar, además, que el actuador mantenga la planta en el estado deseado por el controlador.

FUNDAMENTOS

En la actualidad se utilizan dos estándares para la implementación de redes de conmutación de paquetes a nivel LAN (Red de Área Local) y WLAN (Red de Área Local Inalámbrica):

- Ethernet, estandarizado por la IEEE como IEEE 802.3. Se presenta como el estándar más utilizado para la implementación de redes locales cableadas. Define la comunicación entre dispositivos en los niveles 1 y 2 del modelo OSI e implementa un mecanismo de acceso al medio para garantizar la transmisión. El mecanismo utilizado es CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collition Detection); básicamente, lo que hace es detectar si existe portadora en el medio de transmisión y, si encuentra el medio libre, envía una trama de datos. A continuación vuelve a sensar el medio y detecta si ha ocurrido una colisión; si detecta una colisión, espera un tiempo y vuelve a intentar transmitir.

  Ethernet ha ido evolucionando y actualmente las velocidades de transmisión utilizadas comúnmente alcanzan los de 100 a 1000 Mbps y el medio de transmisión utilizado es cable UTP categoría 5e ó 6. La distancia máxima de transmisión utilizando cable UTP sin necesidad de un repetidor es de 100 m.

- El estándar IEEE 802.11, utilizado como estándar por defecto para la implementación de redes inalámbricas de área local. Define la comunicación entre dispositivos inalámbricos en los niveles 1 y 2 del modelo OSI y el mecanismo que implementa para garantizar el acceso al medio se conoce como CSMA/CA (Carriere Sense Multiple Access with Collition Avoidance). Este mecanismo sensa inicialmente si existe una portadora en el canal de trabajo antes de transmitir; en caso no encuentre portadora transmite. Como en un despliegue inalámbrico es complicado detectar colisiones lo que hace es utilizar tramas de control especiales para notificar que estación está transmitiendo (utilizando el medio) en un determinado momento, el resto de estaciones esperan su turno; de esta manera en vez de detectar las colisiones las evita.

  Al igual que Ethernet, el IEEE 802.11 ha ido evolucionando y actualmente contamos con estándares de transmisión que alcanzan velocidades de 54 Mbps, estándares g y a, hasta más de 300 Mbps con el estándar n. Las portadoras utilizadas para transmisión están alrededor de los 2,4 Ghz y 5,2 Ghz de acuerdo a los estándares. Las distancias de cobertura dependen de la potencia de transmisión y las ganancias de las antenas utilizadas, aunque por lo general los dispositivos alcanzan un máximo de 100 m estables.

  Si bien es cierto que las velocidades oscilan entre 54 Mbps y 300 Mbps (con el estándar n se puede alcanzar mayores velocidades) estas velocidades están ligadas a la distancia y a la potencia de la señal que capta el receptor.

Para el envío de las tramas ya sea por medios cableados o inalámbricos utilizando los estándares antes descritos se utilizan dispositivos de conectividad de red. Estos dispositivos trabajan principalmente en las capas 1, 2 y 3 del modelo OSI según sea el caso. Como en la conmutación de paquetes cada paquete debe llevar información de control en una cabecera y cada capa del modelo OSI agrega una cabecera. Los paquetes permanecerán en cada dispositivo de conectividad por un periodo de tiempo mientras estas cabeceras son leídas. Este periodo de tiempo se le conoce como latencia y su duración depende de la velocidad de procesamiento del equipo, del tamaño del paquete, etc. Por tanto, si un paquete debe cruzar a través de varios dispositivos de conectividad antes de llegar a su destino el tiempo total de latencia aumenta.

Mientras los dispositivos de conectividad trabajan llevando los paquetes dando saltos nodo a nodo, en los extremos de la comunicación (origen y destino) se utilizan protocolos de capas superiores, también conocidos como protocolos de extremo a extremo. Entre estos protocolos, en la capa de transporte encontramos a TCP (Transport Control Protocolo) y UDP (User Datagram protocol); la diferencia entre ellos radica en que el primero es confiable, ya que controla el flujo de comunicación, enterándose si hay paquetes perdidos o dañados para solici-

tar su retransmisión, pero en consecuencia es lento. Por otro lado UDP no es un protocolo confiable ya que no hace control de flujo, pero en consecuencia es rápido.

Como se puede observar, las redes de conmutación de paquetes están implementadas de manera extendida y las podemos encontrar prácticamente en cualquier lugar; pero como desventaja presentan problemas de pérdidas de paquetes, ya sea por colisiones o problemas en el medio de transmisión (sobre todo si es una red inalámbrica) y de retardos de transmisión causados por congestionamiento en los enlaces y la latencia de los dispositivos de conectividad.

Cuando los requerimientos de transmisión de información de control obligan a utilizar tecnologías de conmutación de paquetes, se hace necesario contar con aplicaciones robustas y confiables que puedan responder adecuadamente a los problemas de pérdidas de paquetes y retardos causados por la red.

Conociendo los problemas de las redes de conmutación de paquetes que causan la pérdida o retraso de los comandos de control, este trabajo propone el desarrollo de una aplicación en tiempo real para el control a distancia de una planta cuando es necesario utilizar como plataforma de comunicaciones una red de conmutación de paquetes, tal como se observa en la figura 1.

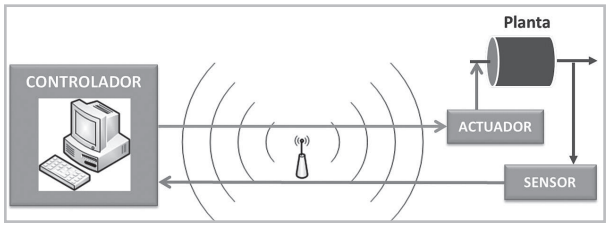


Figura 1

Se utilizara un método predictivo que garantice que el actuador tenga suficientes comandos que le permitan mantener a la planta en el estado deseado.

METODOLOGÍA

Para implementar un banco de pruebas se han simulado los diferentes elementos que participarán en el sistema. La simulación será desarrollada utilizando el lenguaje Orientado a Objetos Java con soporte para tiempo real; para este fin no utilizaremos la Máquina Virtual de Java (JVM) convencional, sino una JVM para Tiempo Real que incluye clases especiales para el manejo de este tipo de aplicaciones. Todos los elementos serán simulados a través de clases de objetos, según lo siguiente:

- La planta es representada por un motor discreto el cual será modelado matemáticamente e implementado a través de una clase en Java.
- La variable controlada es la velocidad angular del motor.
- El sensor es modelado e implementado utilizando una clase en Java. Se encarga de leer la variable controlada y enviarla al controlador.
- El actuador es modelado e implementado a través de una clase Java. Su función es actualizar el valor de las variables del motor discreto para llevar el valor de la velocidad angular al valor deseado.
- Finalmente, el controlador es modelado matemáticamente e implementado en una clase en Java.

En la figura 2 podemos observar cómo interactúan estos elementos.

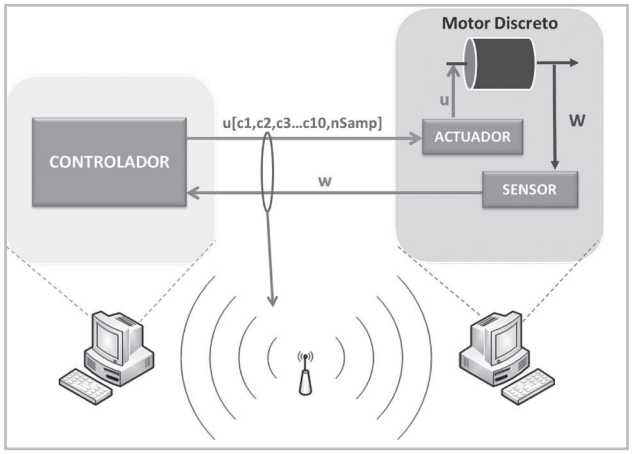


Figura 2

El controlador es ejecutado en una computadora, recibe com entrada la velocidad angular (w) y envía un arreglo con los comandos de control. El motor, el sensor y el actuador se ejecutan en otra computadora. Ambas están interconectadas por una red de conmutación de paquetes, que puede ser cableada o inalámbrica.

A continuación se detallan los pasos seguidos para llegar al modelo final de la figura 2. En la Etapa 0 se realizó el modelo matemático del motor y del controlador. Con la ayuda de matlab se hallaron los coeficientes de las matrices de estado. Luego son programados en Java en las clases correspondiente, la figura 3 muestra las matrices de estado del motor y la figura 4 las matrices de estado del controlador.

```
import javax.realtime.*;

public class MotorDiscreto extends RealtimeThread{

    private double[][] A={{0.3678,0.0564},{-0.0011,0.8187}};
    private double[][] B={{0.0069},{0.1813}};
    private double[][] C={{1,0}};
    private double[][] D={{0}};
    private double[][] x={{0},{0}};
    private double[][] y={{0}};
    private double[][] u={{0}};
```

Figura 3

```
import javax.realtime.*;

public class Controlador extends RealtimeThread{

    private double[][] Aod={{0.0315,0.0806},{-7.2515,1.4599}};
    private double[][] Bod={{0.1379},{2.0033}};

    private double[][] Kcd={{28.9471,-3.5375}};

    private double Ki=6.54; //Ganancia local 6.54, remoto 6.9
    private double sp=1.0; //Setpoint
```

Figura 4

Una vez programadas las matrices de estado se procede con la siguiente etapa.

En la etapa 1 o etapa de control local se hacen las pruebas a los modelos matemáticos hallados en la Etapa 0. Aquí no se está utilizando ningún tipo de control en tiempo real todavía, esta etapa nos permite garantizar el funcionamiento de los modelos matemáticos creados y a la vez los resultados obtenidos nos servirán como datos de control para las pruebas posteriores. Ver figura 5.

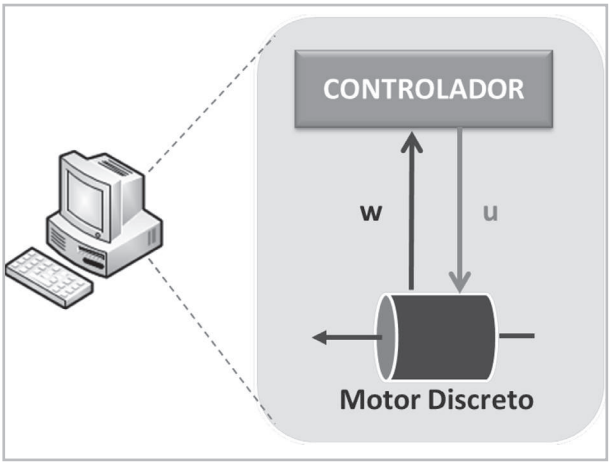


Figura 5

Para esto se implementa un control local solo con el controlador y el motor, las variable controlada (w) y el comando de control (u) serán pasados directamente entre ambas clases. Las clases creadas son las siguientes:

Clase Builder, es la clase principal. Aquí se crean los parámetros para programar las tareas e ingresan las tareas a la computadora. Desde esta clase se lanzan los objetos controlador y motor discreto como hilos independientes.

Clase motor discreto. Esta clase modela el motor discreto que deseamos controlar, tiene como métodos:

- getMotorW ➔ obtiene la velocidad del motor en un momento dado.
- setMotorU ➔ setea el valor del parámetro u en el motor.
- run ➔ ejecuta el modelo del motor en un hilo.

Esta clase muestra en pantalla la variación de W de acuerdo a los parámetros de control.

Clase Controlador. Esta clase modela el controlador que mantiene el motor en una velocidad angular dada por el set point. Entre sus métodos está:

- run ➔ método que ejecuta el modelo del controlador en un hilo diferente.

Entre los parámetros que le pasamos a la clase Controlador, está un objeto de tipo motor discreto, utilizaremos este objeto para acceder a los métodos getMotorW y setMotorU, que usaremos tanto para leer como para modificar el valor del parámetro de control u.

Clase Matrix. Esta clase contiene métodos para realizar operaciones con matrices como: multiplicación, suma.

La figura 6 muestra cómo interactúan las clases mencionadas arriba.

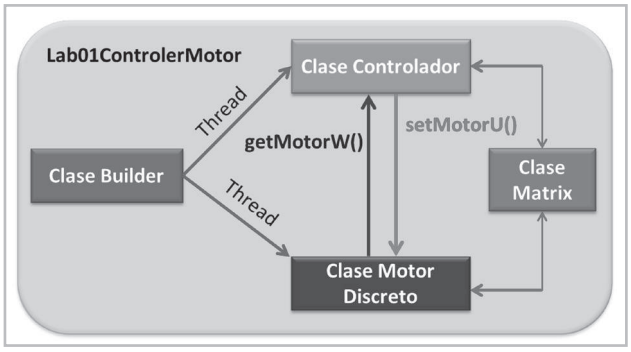


Figura 6

La etapa 2 o etapa de control remoto se realiza una vez que las pruebas de la etapa uno muestran que tanto el controlador y el motor funcionan adecuadamente. En esta etapa la clase controlador es ejecutada en una computadora y el motor se eje-

cuta en otra computadora, donde además se crean las clases sensor y actuador. Esta etapa nos sirve para hacer las pruebas de envió de los parámetros de control a través de la red de conmutación de paquetes. En esta etapa se realizan pruebas utilizando tanto redes cableadas Ethernet a 100Mbps como redes inalámbricas IEEE 802.11g a 54 Mbps.

Cabe resaltar que aún no se está usando el método de control predictivo.

La figura 7 nos muestra el diagrama de la implementación.

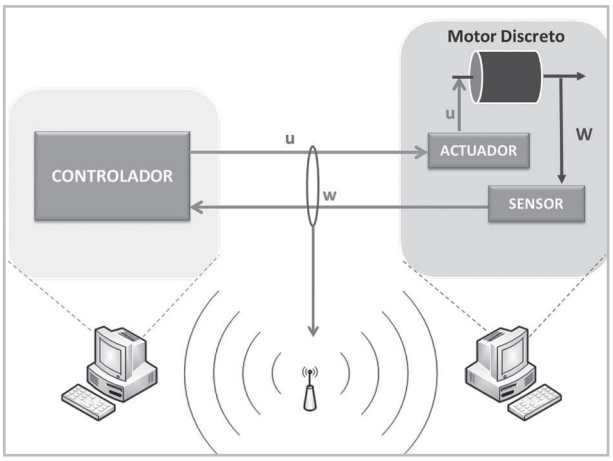


Figura 7

Para simular el sistema se crean dos programas:

Lab02ActuadorSesor que consta de las siguientes clases:

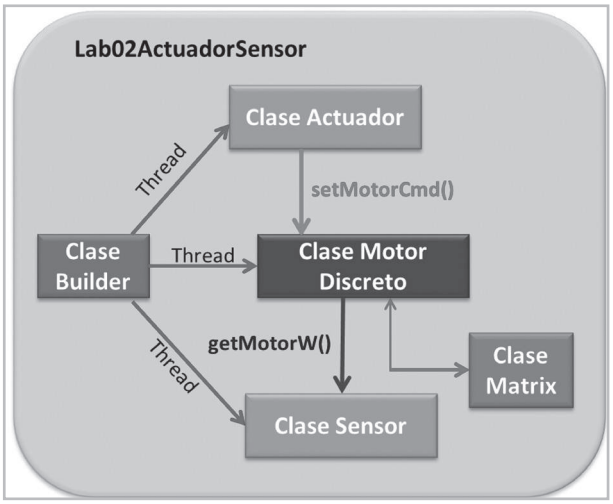


Figura 8

Clase Builder, es la clase principal, aquí se crean los parámetros para programar las tareas e ingresan las tareas a la computadora. Desde esta clase se lanzan los objetos controlador y motor discreto como hilos independientes.

Clase motor discreto. Esta clase modela el motor discreto es la misma implementada en la etapa 1.

Clase Sensor. Esta clase modela el sensor que deberá leer constantemente el valor de la velocidad angular del motor discreto, invocando al método getMotorW(). Una vez obtenido, lo envía a través de la red hacia el controlador.

Clase Actuador. Esta clase modela el actuador, que recibe los comandos del controlador desde la red y los aplica al motor discreto invocando el método setMotorCmd.

Clase Matrix

Lab02Controlador, consta de las siguientes clases:

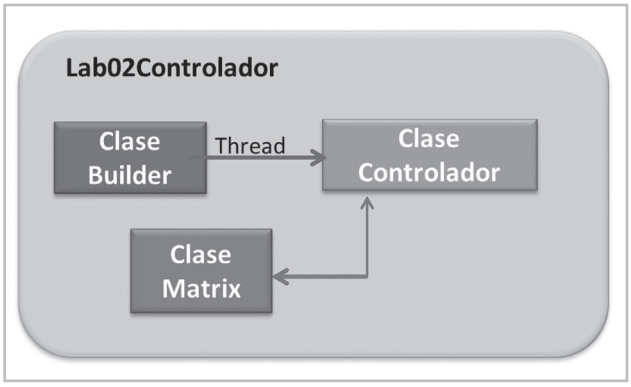


Figura 9

Clase Builder es la clase principal, aquí creamos los parámetros para programar las tareas e ingresamos las tareas a la computadora. Desde esta clase lanzamos el objeto controlador.

Clase Controlador. Esta clase modela el controlador que mantiene el motor en una velocidad angular dada por el set point. Es la misma que la etapa 0.

El programa controlador a través de la clase Builder utiliza un Thread (hilo) para ejecutar una instancia de la clase Controlador. En este caso, la clase Controlador extiende la clase RealTimeThread que garantiza el uso de funciones para manejar tiempo real. Para esto es necesario incluir la librería javax.realtime.*; que contiene clases y métodos para tal fin.

Tanto las clases controlador, sensor y actuador, extienden la clase RealTimeThread. Por tanto, algo que las tres clases tienen en común es que ejecutaran un método periódicamente (este método es diferente y de acuerdo a cada clase) para tal fin la JVM-RT colocará en la pila de procesos del Sistema Operativo esta tarea periódica.

La clase Controlador dentro de la tarea periódica implementa 2 sockets UDP, uno de ellos recibe del sensor el valor de la variable de control y, utilizando su función de transferencia, genera un comando de control. El segundo socket UDP se utiliza para enviar hacia el actuador el comando calculado. El uso del protocolo UDP, en vez de TCP, es debido a que los comandos de control deben llegar con rapidez y no demorarse a causa de confirmación o solicitudes de retransmisión entre los extremos.

En el caso de la clase Sensor, la tarea periódica le permite tomar una muestra del valor actual de la variable controlada (w), y enviarla por un socket UDP al controlador.

Y, finalmente, la clase Actuador implementa la tarea que escucha periódicamente en un socket UDP, a la espera de un comando de control para ser aplicado. Si se pierde la conexión o los paquetes llegan retrasados, el actuador no tendrá comando que ejecutar y, por tanto, perdería el control del motor.

La etapa 3 o etapa de control remoto predictivo. En esta etapa se utilizan las mismas clases utilizadas en la etapa 2. La diferencia principal es que aquí se implementa el control predictivo tanto en el controlador como en el actuador.

El control predictivo se implementa creando un arreglo de comandos de control en vez de un solo comando de control en el controlador. De tal manera que el actuador reciba el arreglo de comandos y los utilice periódicamente, uno a uno, siempre que no le lleguen comandos de control a través de la red.

En la figura 10 observamos cómo se implementa la etapa 3.

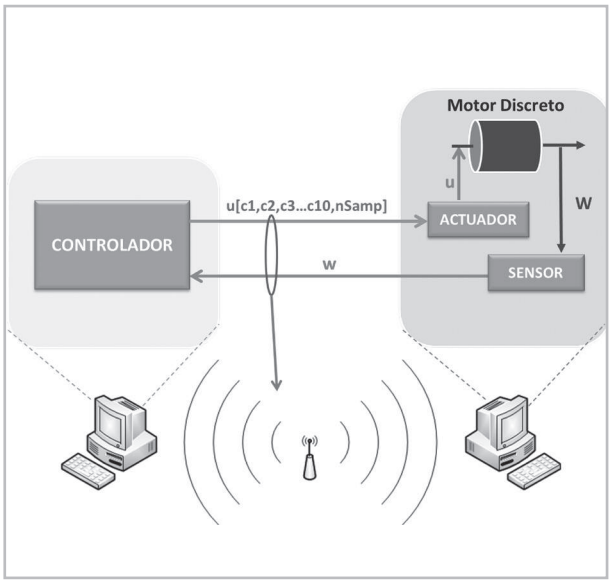


Figura 10

Para simular el sistema se modifican los dos programas de la etapa 2:

Lab03ActuadorSensor:

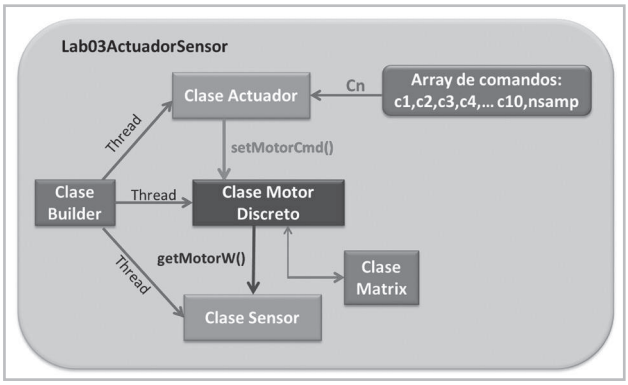


Figura 11

Clase Builder es la clase principal, aquí creamos los parámetros para programar las tareas e ingresamos las tareas a la computadora. Desde esta clase lanzamos a los objetos actuador, sensor y motor discreto como hilos independientes.

Clase Motor discreto es la misma clase de la etapa 02.

Clase Sensor, es la misma clase de la etapa 02.

Clase Actuador. Esta clase modela el actuador quien recibe los comandos del controlador desde la red y los aplica al motor discreto, invocando el método setMotorCmd.

Como estamos utilizando un método de control predictivo para garantizar el control en tiempo real, incluso en casos de pérdida de conectividad con el controlador, el actuador recibe no solo un comando sino un array. Este array está compuesto por:

- 10 comandos + número de muestra (nsamp).
- Los comandos son calculados por el controlador y enviados al actuador.
- El número de muestra (nsamp) es un contador generado por el controlador. Se utiliza para determinar el número de muestra enviado y poder discriminar muestras antiguas.
- En caso que un error de conectividad evite que el actuador reciba un paquete de control, el actuador tomara otro comando del último array de control recibido.

En la figura 12 se observa cómo se implementa el array de comandos. El array serializado es recibido a través de un socket UPD, el array se deserializa y se guarda en rcvCmdArray().

```
47      DatagramSocket socket = new DatagramSocket(serverPort);
48      DatagramPacket cmdRecieved = new DatagramPacket(buffer,buffer.length);
49      socket.receive(cmdRecieved);
50
51      ByteArrayInputStream byteStream =
52              new ByteArrayInputStream(cmdRecieved.getData());
53      ObjectInputStream ois =
54              new ObjectInputStream(new BufferedInputStream(byteStream));
55      rcvCmdArray = (double[])ois.readObject();
56
57
58      ois.close();
59      socket.close();
```

Figura 12

Una vez recibido rcvCmdArray() es evaluado en un lazo IF. Si el nSamp (contador de muestra) es mayor al último número de muestra recibido, se actualiza el array rCmdArray() con el nuevo paquete. En caso de que sea una muestra antigua, se descarta. Luego, se toma el primer comando de rCmdArray y se actualiza el contenido. Este comando se envía al motor a través del método setMotorCmd().

Lab03Controlador

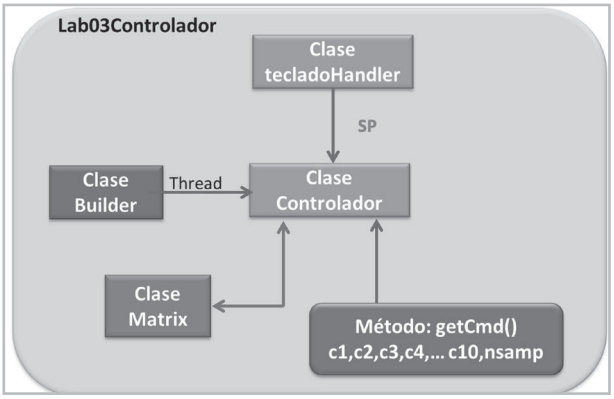


Figura 13

Clase Builder es la clase principal, aquí creamos los parámetros para programar las tareas e ingresamos las tareas a la computadora. Desde esta clase lanzamos el objeto controlador.

Clase Controlador. Esta clase modela el controlador que mantiene el motor en una velocidad angular dada por el *set point*.

- run ➔ ejecuta el modelo del controlador en un hilo diferente.

En la figura 14 se muestra el código de cómo se crean los próximos 10 comandos de control.

```
129     cmd = sp*Ki - u[0][0];
130
131     rCmdArray[0] = cmd;
132
133     cSamp ++;
134     int i;
135     for(i=0; i<(nSamp-1); i++){
136
137         yr[0][0] = rCmdArray[i];
138
139         Matrix.Mult(Aod, 2, 2, x, 2, 1, max);
140         Matrix.Mult(Bod, 2, 1, yr, 1, 1, mby);
141         Matrix.Add(max, mby, x, 2, 1);
142
143         Matrix.Mult(Kcd, 1, 2, x, 2, 1, ur);
144
145         cmd = sp*Ki - ur[0][0];
146
147         rCmdArray[i+1] = cmd;
148     }
149     rCmdArray[nSamp] = cSamp;
150
151     return rCmdArray;
```

Figura 14

Al aplicar un método de control predictivo, el controlador debe predecir los próximos comandos de control en caso que un error de conectividad obligue que se pierdan paquetes con información de control. El array obtenido rCmdArray() es enviado serializado al actuador a través de un socket UDP.

Para trabajar en diversas condiciones de red se utilizaron los siguientes escenarios:

- Escenario 1, Ethernet con retardo moderado entre 10 y 30 ms. Se utilizó un switch de 8 puertos donde solo se conectaron dos computadoras.

- Escenario 2, Ethernet con retardo alto entre 500 y 800 ms, alta probabilidad de perdida de paquetes. Se probó en un laboratorio con 10 computadoras; adicionalmente la computadora actuador tenía una carpeta compartida de la cual se descargaron archivos desde varias computadoras para simular alto tráfico.

- Escenario 3, IEEE 802.11g con retardo moderado entre 10 y 30 ms. Se utilizó un AP conectando solamente dos computadoras.

- Escenario 4, IEEE 802.11g con retardo alto entre 500 y 800 ms alta probabilidad de perdida de paquetes. Se conectaron 6 dispositivos inalámbricos a un mismo AP y se iniciaron descargas de archivos pesados entre ellos. Adicionalmente las computadoras que ejecutaban los programas controlador y actuador se colocaron a un distancia mayor observando una velocidad de 11 Mbps.

RESULTADOS

Utilizando el sistema simulado descrito en la sección anterior se realizaron pruebas en cada una de las etapas. Estas pruebas utilizaron como redes de conmutación de paquetes a Ethernet y al estándar inalámbrico IEEE802.11. La clase motor discreto incluye un método que muestra la variación de la velocidad angular (w), que es la variable controlada en cada periodo a través de un contador. Este valor fue utilizado para medir la rapidez de la convergencia de W en cada etapa y se utilizó el comando ping para medir los retardos entre dispositivos en las diferentes redes.

Los resultados obtenidos nos indican que:

- En el escenario 1 el controlador (no predictivo) alcanza el *set point* en 80 periodos.
- En el escenario 1 el controlador predictivo alcanza el *set point* en 79 a 80 periodos.
- En el escenario 2 el controlador (no predictivo) alcanza el *set point* en 102 periodos.
- En el escenario 2 el controlador predictivo alcanza el *set point* en 88 periodos.
- En el escenario 3 el controlador (no predictivo) alcanza el *set point* en 83 periodos.
- En el escenario 3 el controlador predictivo alcanza el *set point* en 79 a 80 periodos.
- En el escenario 4 el controlador (no predictivo) alcanza el *set point* en 145 periodos. Y llega a perder el control.
- En el escenario 4 el controlador predictivo alcanza el *set point* en 92 periodos. Aunque, en algunos casos llega a perder el control y lo recupera en aproximadamente 60 periodos adicionales.

CONCLUSIONES

Según los resultados obtenidos se puede concluir lo siguiente:

- En escenarios con retardos pequeños y probabilidad baja de pérdida de paquetes, tanto el control no predictivo como el control predictivo presentan la misma respuesta.
- En escenarios con retardos significativos y mayor probabilidad de perdida de paquetes el control predictivo tiene un excelente desempeño manteniéndose con una respuesta muy similar al escenario anterior. El control no predictivo si llega incluso a perder el control del motor.
- Entre los escenarios cableados e inalámbricos, es el escenario inalámbrico el que produce un mayor retardo y probabilidad de perdida de paquetes.
- En casos de alto tráfico y pérdidas de paquetes por congestionamiento del enlace el método predictivo también puede llegar a perder el control; pero esto puede ser controlado aumentando el número de comandos de control que se envían en el array desde el controlador al actuador.
- Adicionalmente, cabe mencionar que se deben realizar una mayor cantidad de pruebas planteando otros escenarios, como por ejemplo enviar comandos de control a través de internet o de redes ruteadas.

REFERENCIAS

[1] HALLSAL, Fred. *Computer Networking and the Internet*. Addison Wesley, 2006.

[2] DIBBLE, Peter. *Real-Time Java Platform Programming*. Sun, 2002.

[3] Real Time Specification for Java.

ACERCA DEL AUTOR

Ingeniero Electrónico, con estudios de maestría en Telemática. Profesor a tiempo parcial en TECSUP en el área de Redes y Comunicaciones; sus áreas de interés son la ingeniería de tráfico, las comunicaciones unificadas y el estudio de protocolos de red; adicionalmente a su trabajo académico realiza consultorías para empresas del medio. Actualmente se desempeña como coordinador y profesor de la carrera de Telecomunicaciones y Redes en la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas.

Original recibido: 2 de diciembre de 2010
Aceptado para publicación: 10 de diciembre de 2010

La sociedad del conocimiento, competencias y la formación universitaria

The knowledge society, skills and university education

Marco Aurelio Zevallos Y Muñiz, *Tecsup*

"Lo que la invención de la imprenta hizo por la Humanidad cinco siglos atrás, lo está haciendo en el día de hoy la computadora. Éste ha estimulado un cambio radical en todos los aspectos de nuestra vida, moviéndose con una velocidad arrolladora y desatando fuerzas que probablemente serán traumáticas".

Jean-Jacques Servan-Schreibeir, *La revolución del conocimiento, 1987*

Resumen

El presente trabajo muestra la evolución de las sociedades desde la agrícola hasta la actual del conocimiento.

Esta evolución se debe principalmente a los avances logrados en la ciencia y tecnología, teniendo como base a la investigación y el desarrollo. Apoyado por el auge de las tecnologías de la información y comunicaciones.

Si se desea lograr una educación universitaria de calidad se debe plantear la formación de los futuros profesionales e investigadores mediante las competencias y las modernas técnicas de enseñanza.

Se presentan los lineamientos para elaborar el plan estratégico de una universidad así como el diseño del perfil profesional bajo la consideración del concepto de competencias; benchmarking, el diseño curricular y las nuevas técnicas de aprendizaje.

Abstract

The present work shows the evolution of society from the agriculture society to the actual knowledge society.

This evolution has been possible a cause of the advance of science, technology, research and development.

In order to produce innovative processes for the next generation of leaders it must be necessary the formation by competences and obtain skills to be developed.

This work presents the policy in order to elaborate an strategic plan for a university as well as the professional profile using the concept of competences, benchmarking curricula design and new learning techniques.

Palabras clave

Sociedad de la información, sociedad del conocimiento, ciencia y tecnología, investigación y desarrollo, competencias, plan estratégico, diseño curricular, perfil profesional, benchmarking, nuevas técnicas de aprendizaje, tutorías.

Key words

Information society, knowledge society, science and technology, research and development, competencies, strategic plan, curriculum, professional profile, benchmarking, learning and new techniques, tutorials.

INTRODUCCIÓN

Todo cambio es el resultado de un proceso que toma un tiempo y no existe una fecha determinada de comienzo.

Llegar a lo que ahora se llama la sociedad del conocimiento, ha tomado mas de 50 años.

En esta publicación se presenta en primer lugar el concepto de sociedad de información, término que fuera acuñado por diferentes especialistas y que indican un nuevo cambio en la sociedad, apareciendo como principal paradigma el manejo, la influencia de la información y la existencia de un nuevo tipo de industrias basadas en las ciencias.

Después se presenta el concepto de sociedad de conocimiento como nuevo paradigma, que está basada en el uso intensivo de las tecnologías de la información y comunicaciones (TIC); así como el proceso de globalización y la revolución científico tecnológica que está cambiando radicalmente las bases de la sociedad.

En la tercera parte se muestra que este cambio producido es producto de los avances en la Ciencia y Tecnología (C+T), debido al crecimiento de sus principales componentes., que son la Investigación y Desarrollo (I+D). Se enfatiza en la formación universitaria de clase mundial así como la formación de maestros y doctores del mismo nivel.

En la cuarta parte se dan los lineamientos para la formulación de un plan estratégico de una universidad que comienza con la elaboración de la Misión, Visión y Ética; para después pasar a explicar las diferentes metodologías que existen.

En la siguiente parte se describe el concepto del perfil profesional que debe tener todo egresado universitario así como las metodologías para la medición de dicho perfil; siendo este el conjunto de capacidades y competencias que identifican la formación que debe de tener un alumno de una universidad.

Después se reseña el concepto de competencias, así como la evolución en la formación universitaria; se analizan los diferentes tipos de competencias para culminar con la taxonomía presentada por Bloom de habilidades y pensamiento así como de otras taxonomías que presenta Brenda Margel y las implicancias que debe tener.

Finalmente, se analiza, cómo debe elaborarse el diseño curricular así como las técnicas modernas para la puesta en marcha del proceso de aprendizaje. Se dedica una última parte a destacar de una manera muy sucinta el tema de las tutorías.

SOCIEDAD DE LA INFORMACIÓN

La sociedad de la información es aquella que se forma posteriormente a la sociedad industrial, donde el componente principal es el manejo de la información y su tratamiento automatizado.

Hace mas de 50 años Norbert Wiener, creador de la "Cibernética" anunciaba en su libro "*Cibernética y sociedad*" [1] (1950) el advenimiento de una sociedad basada en la información, donde considera a la información como una materia prima de libre circulación.

En 1962, el economista austriaco-estadounidense Fritz Machlup escribe el libro *The Production and distribution Knowlegde* [2] donde acuña por primera vez el termino de sociedad de la información y le da a la producción del conocimiento un significado económico mediante la mezcla de actividades de información y comunicación.

En 1966, Yoneji Masuda presenta un libro titulado *Computopía* [3], donde presenta a la emergente sociedad de la información.

En 1969, el Ministerio de Industria y Comercio del Japón (MITI), presenta lo que se conoce como el "Plan Jacudi" donde muestran que se esta yendo hacia la informatización de la sociedad.

En 1969, Alain Touraine, sociólogo francés, escribe un documento titulado "La Societé Post-industrielle"[4], donde menciona que la sociedad industrial ha sido sobrepasada.

En 1972, el Japan Computer Usage Development Institute (JACUDI), presenta al gobierno el documento que contiene el plan para la sociedad de la información, que es un objetivo nacional para el año 2000 y presenta una propuesta sobre las políticas públicas que deberán seguirse.

En 1973, Daniel Bell en su famoso libro *El advenimiento de la sociedad postindustrial* [5], menciona que el componente principal de esta nueva sociedad será la información y los servicios; donde existirá un nuevo tipo de industria basados en las ciencias.

En 1977, Marc Porat en su libro *The Information Economy Definitions and Mesurement* [6], delinea un nuevo campo de la actividad productiva,. que llama "La economía de la información".

En 1978, Simon Nora y Alain Minc a pedido del entonces presidente de Francia Valerie Giscard D`Staing elaboran el informe titulado "La informatización de la Sociedad"[7]. Aquí enfatizan el desarrollo de la industria de los servicios y de telecomunicaciones, empleando por primera vez el neologismo "telemática".

En 1978, John Naisbitt, en su libro "Megatendencias"[8] habla de la sociedad de la información como uno de las metas a las cuales se llegará.

Quien mejor grafica este resultado es Alvin Toffler, que en el año 1979 publica *La tercera ola* [9]. Menciona que la primera ola es de la agricultura que dura desde 8000 a. c. hasta el siglo XVII; la segunda ola viene a ser de la revolución industrial y data de entre 1770 y 1950. La tercera ola es de los servicios que es a partir de 1950.

En 1979 Zbigniew Brzezinski en su libro *La sociedad tecnotrónica* [10], menciona que la tecnología y la electrónica serán los dos grandes pilares de esta nueva sociedad.

En 1980 Yoneji Masuda fundador y presidente del Instituto para la Sociedad y la Información publica el libro *La sociedad de la información como una sociedad post industrial* [11]. Delineando los planes estratégicos adecuados para una mejor adaptación a este nuevo tipo de sociedad.

SOCIEDAD DEL CONOCIMIENTO

Después de lo que se llamo la sociedad de la información, nace el concepto de la sociedad del conocimiento.

Esta nueva sociedad puede generar y utilizar el conocimiento para lograr su desarrollo.

Está basada principalmente en el uso intensivo de las tecnologías de la información y comunicaciones (TIC).

En 1992, Manuel Castells en su libro *La era de la información: economía sociedad y cultura Vol.I La sociedad red* [12], aborda el proceso de globalización y la revolución tecnológica que esta cambiando radicalmente las bases de la sociedad.

En 1993, Peter Drucker en su libro *La sociedad postcapitalista* [13], habla del proceso de transformación de esta sociedad basada en lo que el llama la sociedad del saber".

En 1994 Taichi Sakaiya en su libro *Historia del futuro: la sociedad del conocimiento* [14], menciona la esencia del valor del conocimiento que generará una nueva sociedad.

En 1996 José B. Terceiro en su libro *Sociedad digital: Del homo sapiens al homo digitalis* [15], menciona las nuevas posibilidades que presenta la revolución digital en todos los procesos y trabajos que tienen como base a las TIC.

En 1998 Andreas Credé y Robin Mansell redactán un informe para la ONU: *Las sociedades de conocimiento… en síntesis Tecnología de la información para un desarrollo sustentable* [16], insistiendo nuevamente en la importancia de las TIC en la nueva sociedad que denominan la sociedad cableada.

En 1999 David Korten en su libro *El mundo post empresarial* [17], habla de que tendremos, debido a las TIC, una nueva conciencia planetaria y el surgimiento de una inteligencia planetaria.

En 2005, la UNESCO publicó el informe *Hacia las sociedades del conocimiento* [18], en el que menciona que hay un desequilibrio del conocimiento en las sociedades actuales y que se debe tender a igualar dichos conocimientos, propiciando lo que se ha llamado el aprendizaje durante toda la vida (*Long Life Learning*).

CIENCIA, TECNOLOGÍA, INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

El desarrollo de cualquier país está basado fundamentalmente en el uso de la Ciencia y la Tecnología (C+T) con la Investigación y Desarrollo (I+D) como factores preponderantes.

En la nueva sociedad del conocimiento existe una marcada diferencia entre las sociedades desarrolladas y las que están en vías de desarrollo; lo que genera la llamada brecha tecnológica.

La única forma de superar estas carencias es lograr una formación integral de primer nivel.

Carl von Weizsäcker en *La importancia de la ciencia* [19] de 1966, menciona que en un inicio la ciencia y la tecnología trabajaban de forma separadas; sin embargo a partir de los comienzos del siglo XX, se empiezan a enlazar ambos conocimientos, con lo que se llega a tener ahora un solo árbol unido de la ciencia y la tecnología.

En 1968 Jean Jacques Servan-Schreiber en *El desafío americano* [20], muestra que para pasar del invento científico a la explotación industrial se han necesitado:

- 112 años para la fotografía (1727-1839)
- 56 años para el teléfono (1820-1876)
- 35 años para la radio (1867-1902)
- 15 años para el radar (1925-1940)
- 6 años para la bomba atómica (1939-1945)
- 5 años para el transistor (1948-1953)
- 3 años para el circuito integrado (1958-1961)

Esto nos muestra, en líneas generales, la importancia que se debe dar al tema de la formación científica y tecnológica y a los procesos de investigación y desarrollo.

El principal creador de conocimiento es la universidad, pues se tiene por un lado la formación de pregrado, que conlleva a la titulación de profesionales de primer nivel.

Por otro lado en la formación de maestros y doctores se da el énfasis en el factor de la investigación.

La investigación en estos niveles tiene que abarcar los tres estratos, es decir:

- Investigación básica
- Investigación aplicada
- Desarrollo experimental

Todos estos factores se deben ver reflejados en el Plan Estratégico de la universidad.

PLAN ESTRATÉGICO DE LA UNIVERSIDAD

Todo plan estratégico debe comenzar definiendo la Misión, la Visión, la Ética que darán el marco conceptual para la definición del plan.

MISIÓN

La Misión es la razón de ser de la institución.

Para formular una propuesta de Misión existen varias formas dentro de las cuales mencionaremos las más conocidas:

Modelo de Derek Abell[21]

Este modelo responde a tres preguntas, que son las siguientes.

- A quién satisface (grupo de clientes)
- Qué se satisface (necesidades del cliente)
- Cómo se satisfacen las necesidades del cliente (habilidades distintivas)

Modelo del cuadro de mando integral (Modelo del Balance Score Card)[22]

Responde a las tres preguntas anteriores añadiendo las dos siguientes:

- Actuando e innovando que producto o servicio (anticipándose a las necesidades del cliente)
- Dónde se debe actuar (tanto a nivel nacional como internacional)

VISIÓN

La visión es la imagen de la institución en un futuro. Este futuro abarca el mediano y largo plazo.

Harry Jackson y Norman Frigon en *Logrando la ventaja competitiva* [23], diseñan una matriz de pertinencia. donde figuran las principales metas y la dependencia que hay entre ellas para definir y cuantificar la visión.

ÉTICA

Un tema de gravitación importante en la actualidad es la Ética que debe tener cualquier empresa o institución.

Tratándose de una organización universitaria donde se forman los futuros cuadros dirigenciales de un país este concepto toma una mayor dimensión.

Humberto Serna Gómez en *Gerencia Estratégica* [24], del 2003, muestra la elaboración de una llamada "matriz axiológica" que debe ayudar para formular la escala de valores de la institución.

Las dimensiones que considera son, por un lado, los principios y por otro, los grupos de referencia.

La elaboración de un plan estratégico toma como base la Misión, Visión y Ética.

Análisis FODA

El análisis FODA implica hacer un:

- Análisis interno de la institución, señalando sus fortalezas (F) y debilidades (D).
- Análisis externo analizando las oportunidades (O) y amenazas (A).

Con estos cuatro factores, conocidos como el análisis FODA, se pasa a elaborar la primera selección estratégica.

Después, se pasa a elaborar las estrategias:

- A nivel funcional.

- A nivel de negocios.
- La estrategia global.
- La estrategia a nivel corporativo.

Análisis de las matrices

Otros instrumentos para poder definir y cuantificar las estrategias, son las señaladas por Fred David en *Conceptos de Administración Estratégica* [25] del 2008:

- Matriz de evaluación de factores internos (EFI).
- Matriz de evaluación de factores externos (EFE).
- Matriz de perfil competitivo (MPC).

Análisis de PORTER

Si bien Porter[26], desarrolla el modelo de las cinco fuerzas para hacer el análisis competitivo en un sector industrial, este modelo puede aplicarse perfectamente a una institución universitaria.

Las cinco fuerzas que se analizan son:

- Rivalidad entre instituciones universitarias.
- Ingreso potencial de nuevas universidades.
- Desarrollo potencial de instituciones que ofrezcan preparaciones sustitutas.
- Capacidad de negociación de los consumidores (padres de familia y estudiantes).
- Capacidad de negociación de los proveedores.

Perfil profesional

El perfil profesional esta definido de acuerdo con un documento de la Generalitat Valenciana (s/f)[27]. Como:

"El conjunto de capacidades y competencias que identifican la formación de una persona para asumir en condiciones óptimas las responsabilidades propias del desarrollo de funciones y tareas de una determinada profesión".

De acuerdo con lo expresado por Red Labora.Net (s/f)[28]; al definir el perfil profesional se dan las características que debe poseer la persona que ocupe un puesto.

Habitualmente se distingue entre:

Requerimientos básicos o fundamentales: que son las "condiciones indispensables" para un rendimiento "normal" en el puesto.

Requerimientos adicionales o complementarios: son las características que, combinadas con los requisitos básicos, permitirían un "rendimiento superior".

De acuerdo a cacei.org (s/f)[29], define el perfil profesional como el:

"Conjunto de conocimientos, capacidades, habilidades, actitudes y valores que debe reunir un egresado para el ejercicio de su profesión".

Como se observa, existen varias definiciones sobre el perfil profesional; las mismas que son prácticamente similares.

METODOLOGÍAS PARA LA DEFINICIÓN DE UN PERFIL PROFESIONAL

Existen varias metodologías para definir un perfil profesional. Se señalarán dos de ellas que se consideran las más relevantes:

Tamara Royán[30] presenta un modelo de desarrollo del perfil profesional basado en el análisis FODA.

Verónica Moreno Oliver[31], presenta un modelo para la definición del perfil profesional basado principalmente en las respuesta a las siguientes preguntas:

- ¿Para qué?
- ¿Respondiendo a qué?
- ¿A quién implica?
- ¿Cuál es el aspecto nuclear del trabajo?
- ¿Qué acciones se van a desarrollar?
- ¿Qué beneficios se van a obtener con relación a la situación actual?

Competencias

"Desde el punto de vista etimológico, encontramos el origen del término competencia en el verbo latino *competere* (ir al encuentro una cosa de otra, encontrarse) para pasar también a acepciones como "responder a, corresponder"; "estar en buen estado" , "ser suficiente", dando lugar a los adjetivos *competens-entis* (participio presente de *competo*) en la línea de competente, conveniente, apropiado para; y los sustantivos "competio-onis" competición en juicio y "competitor-oris" competidor, concurrente, rival." [32]

"Desde el siglo XV nos encontramos con dos verbos en castellano competir y competer que proviniendo del mismo verbo latino (*competere*) se diferencian significativamente, pero a su vez entrañan semánticamente el ámbito de la competencia"[32]

1. Competer: pertenecer o incumbir, dando lugar al sustantivo competencia y al adjetivo competente (apto, adecuado). [32]

2. Competir: pugnar, rivalizar, dando lugar también al sustantivo competencia, competitividad, y al adjetivo competitivo. [32]

De todo esto se puede definir el término de competencia como: competencia es el conjunto de capacidades y saberes técnico metodológicos sociales y participativos que el profesional pone en juego para afrontar las obligaciones y exigencias que le plantea el mundo laboral.

Evolución

El primer informe sobre las nuevas formas que tiene que tomar la educación se debe a Edgar Faure[33] en el informe que presenta en 1972 a la UNESCO: *Aprender a ser*, indicando que la educación del futuro debe estar centrado en los cambios que se están produciendo en ámbito científico técnico.

En el año 1996, Jacques Delors[34] presenta a la UNESCO un informe titulado *La Educación encierra un tesoro*, en el que menciona que la educación para el siglo XXI debe considerar el concepto del aprendizaje durante toda la vida (*Long Life Learning* – LLL), basado en cuatro pilares, que son:

- Saber
- Saber hacer
- Saber estar
- Saber ser

En el año 1998, se reúnen en La Sorbona[35], París, los ministros de educación de Alemania, Francia, Italia y el Reino Unido, con la finalidad de conversar sobre el futuro de la educación universitaria en los países de la comunidad Europea.

En el año 1999 se reúnen en Bolonia[36], Italia, 32 países de la Comunidad Europea para sentar las bases del *Espacio Europeo de la Educación Superior*. Documento que ha servido de base para impulsar la nueva educación universitaria en Europa.

Posteriormente, los ministros encargados de la educación universitaria se han ido reuniendo en diferentes países para confirmar y profundizar las mejoras de la enseñanza universitaria.

Estas reuniones se realizaron en:

- 2001 en Praga
- 2003 en Berlín
- 2005 en Bergen
- 2007 en Londres
- 2009 en Lovaina

Clasificación

Las competencias se pueden clasificar de acuerdo con Francisco Revuelta, de la Universidad de Salamanca, España, de las formas siguientes:

Competencias básicas

Comprender, dominar y aplicar los conceptos y los principios de conocimientos básicos de los cursos formativos de los primeros niveles.

Demostrar visión espacial y conocimiento de las técnicas de representación gráfica.

Aprender, aplicar y trabajar con las diferentes herramientas y programas informáticos.

Adquirir conocimientos sobre el concepto de empresa, su marco institucional y jurídico, así como la organización y gestión de las mismas.

Competencias comunes

Adquirir conocimientos específicos y conocer los principios básicos de los cursos afines a las diferentes carreras.

Adquirir los conocimientos básicos de los sistemas de producción y fabricación.

Adquirir los conocimientos básicos y de aplicación de tecnologías medio ambientales y sostenibilidad.

Ser capaz de aplicar los conocimientos de organización de empresas.

Demostrar los conocimientos y capacidades para organizar y gestionar proyectos. Conocer la estructura organizativa y las funciones de una oficina de proyectos.

Competencias específicas

Ser capaz de diseñar, calcular y programar proyectos de su especialidad.

Demostrar capacidad de ejecución de los diferentes proyectos a su cargo.

Adquirir nuevos conocimientos de su especialidad.

Competencias profesionales

Demostrar capacidad para la redacción y desarrollo de los diferentes informes que tiene que elaborar para elevar a instancias superiores.

Demostrar capacidad para dirigir las actividades de los proyectos.

Conocer, comprender y ser capaz de aplicar la legislación necesaria en el ejercicio de su profesión.

Capacidad para aplicar los principios y métodos de calidad.

Capacidad de organización y planificación en el ámbito de la empresa.

Competencias transversales

Adquirir los conocimientos en las materias básicas y tecnológicas que lo capaciten para el aprendizaje de nuevos métodos y teorías, y dote de versatilidad para adaptarse a las nuevas situaciones.

Resolver problemas con iniciativa, toma de decisiones, creatividad y razonamiento crítico.

Comunicar y transmitir conocimientos, habilidades y destrezas en el campo de su especialidad.

Encontrar, analizar, criticar, relacionar, estructurar y sintetizar información proveniente de diversas fuentes.

Aplicar la informática y las TIC en su ámbito profesional.

Tener motivación por la calidad y la mejora continua.

Ser capaz de comunicarse de forma efectiva en otros idiomas, fundamentalmente en inglés.

Tener una actitud ética y responsable de respeto a las personas y al medio ambiente.

Ser capaz de integrarse rápidamente y trabajar eficientemente en equipos multidisciplinares asumiendo distintos roles y responsabilidades con absoluto respeto a los derechos fundamentales y de igualdad entre hombres y mujeres.

Capacidad de analizar y valorar el impacto social y medioambiental de las soluciones técnicas.

La taxonomía presentada por Benjamin Bloom[37] en 1956, sobre las habilidades y el pensamiento muestra que para cada una de las categorías del dominio cognitivo deben existir habilidades que tendrían que poseer los estudiantes. Es decir, que se deben obtener los objetivos del proceso de aprendizaje donde cada estudiante habría adquirido nuevas habilidades y conocimientos.

La Taxonomía de Bloom comprende seis categorías o niveles, que son los siguientes:

- Conocimiento
- Comprensión
- Aplicación
- Análisis
- Síntesis
- Evaluación

Posterior a la taxonomía de Bloom, Anderson y Krathwol[38] (2000) presentan una taxonomía revisada sobre la base de la preparada por Bloom.

En el año 2008, Churches[39] presenta la Taxonomía de Bloom para la era digital.

Brenda Mergel[40] presenta la taxonomía de Gagne, desarrollada en 1972, y que tiene cinco categorías:

- Información verbal
- Habilidad intelectual
- Estrategia cognitiva
- Actitud
- Habilidades motoras

BENCHMARKING

El concepto de benchmarking implica una evaluación comparativa que se efectúa en la propia institución, con respecto a otras de mayor prestigio, con la finalidad de mejorar el desempeño en todas las organizaciones, incluyendo las universitarias.

Spendolini, en 1994[41], lo define como un proceso continuo y sistemático para evaluar las practicas de negocios de las organizaciones que son reconocidas como las mejores en su clase, con el propósito de una comparación organizacional.

Un manual sobre benchmarking universitario para las universidades australianas ha sido preparado por McKinnon, Walker y Davis[42], donde muestran las diferentes aproximaciones para la aplicación de este concepto en el contexto universitario.

Eduardo Mindreau, en el año 2000[43], adapta el concepto al contexto universitario, bajo la implicación de que la finalidad es una mejora de todos los procesos, para que tengan una competitividad y calidad mundial.

El proceso de benchmarking implica:

- Definir la métrica para elaborar las partes que deben medirse.
- Identificar las brechas, señalando el cuándo, dónde y cuánto.
- Poner en práctica las mejoras.
- Evaluar si se han cerrado las brechas debido a los conocimientos, prácticas y procesos mejorados.

Esto implica, a su vez, comprometer a los niveles dirigenciales de la organización sobre las ventajas de las mejoras y comunicar a toda la organización el desarrollo del proceso para lograr la participación de todos los involucrados.

Mauricio Valle (2005)[44], de la PUC de Valparaíso, desarrolla una metodología para adaptar el benchmarking al análisis de las mallas curriculares de las carreras de ingeniería civil.

Diseña un método de comparación que abarca:

- Las áreas de formación
- Los tipos de actividades
- La flexibilidad
- Lo excluyente (lo que se tiene y no se tiene)

Por ejemplo, en las áreas de formación, compara las ciencias básicas, las ciencias de la ingeniería, las especialidades de ingeniería, las ciencias sociales y las humanidades, así como los electivos de la especialidad.

En los tipos de actividades compara las actividades teóricas, las actividades prácticas, la formación y ética, y las tesis y proyectos.

DISEÑO CURRICULAR

La formación profesional basada en competencias se refleja en el planteamiento curricular, en el planeamiento didáctico y la practica docente.

Ana María Catalano[45], en el 2004, sostenía que el planeamiento curricular implica el diseño curricular y la elaboración de módulos. El planeamiento didáctico del módulo implica la secuencia didáctica y las materias curriculares; mientras que la práctica docente implica las metodologías de enseñanza y la evaluación.

El diseño curricular, basado en competencias, parte de la definición del perfil profesional, es decir, de los desempeños esperados de una persona en su área ocupacional para resolver los problemas propios del ejercicio de su rol profesional.

Rosa María Fuchs [46], de la Universidad del Pacífico, muestra las secuencias que debe seguirse para la elaboración de un plan curricular:

- Redefinición de los perfiles de formación de la universidad.
- Elaboración de matrices para sistematizar la información sobre competencias y capacidades de los cursos rediseñados.
- Análisis de coherencia interna del programa de los cursos rediseñados
- Elaboración de un instrumento de evaluación.

José Luis Bernal, de la Universidad de Zaragoza[47], muestra las fases que debe tener el diseño curricular, y que son:

- Identificación y análisis del contexto: alumnos, centro, asignatura(s) y competencias.
- Selección de objetivos y contenidos, en función de las competencias a desarrollar en los alumnos.
- Estructuración del plan de trabajo de la asignatura.
- Evaluación.

El producto final de la elaboración del plan curricular es lo que se denomina la malla curricular.

Esta malla debe mostrar los cursos y la secuencia de los mismos, es decir, los requisitos que debe tener cada asignatura.

Además, se deben presentar las horas de teoría, las de práctica y el creditaje de cada curso.

TÉCNICAS MODERNAS PARA LA PUESTA EN MARCHA DEL PROCESO DE APRENDIZAJE

Existen tres técnicas modernas de la enseñanza universitaria por competencias.

TÉCNICAS DE APRENDIZAJE COOPERATIVO

Marly Casanova (2008)[48], en su tesis doctoral sustentada en la Universidad de Barcelona, muestra el estudio del proceso interactivo entre iguales.

Señala que el trabajo cooperativo entre alumnos permite la creación de espacios donde las competencias cobran valor, transformándose en capacidades de mediación entre iguales.

La eficacia del proceso, señala la autora, se debe a la composición del grupo; las características de la tarea; la actuación del profesor y el diseño de estudio de casos.

TÉCNICAS DE APRENDIZAJE COLABORATIVO

Elizabeth Barkley et. al., en el 2005 [49], señala que el aprendizaje colaborativo implica que los estudiantes trabajen por parejas o en pequeños grupos para lograr unos objetivos de aprendizaje comunes.

Implica, por otro lado, a un alumnado comprometido en un aprendizaje activo.

Presenta, asimismo, una metodología específica para la implementación del aprendizaje colaborativo, que implica orientar a los estudiantes, formar grupos; estructurar las tareas de aprendizaje; facilitar la colaboración de los estudiantes.

Señala, por otro lado, las diferentes técnicas de aprendizaje colaborativo, que son las técnicas para el dialogo; las técnicas para la enseñanza recíproca; técnicas para la resolución de problemas; técnicas que utilizan organizadores gráficos de información y las técnicas centradas en la escritura.

TÉCNICAS DE APRENDIZAJE BASADO EN PROBLEMAS (ABP)

Alicia Escribano (2008)[50], nos indica que esta técnica surgió hace más de treinta años, en la escuela de medicina de la Universidad de McMaster en Canadá

En esta técnica, el docente se convierte en el tutor de un pequeño grupo de alumnos que tienen que resolver un problema específico con la disciplina de estudio.

Barbara J. Dutch et. al (2006) [51] presenta diferentes modelos para la instrucción, basado en problemas en cursos de pre-gra-

do, así como las estrategias a seguir para el empleo de grupos.

Señala, asimismo, que el ABP está relacionado con las tres C de la tecnología, que son Computación-Comunicación-Compilación.

Ana Pastor de Abram (2007)[52] escribe sobre los tres años de aprendizaje basado en problemas en la PUCP.

TUTORÍAS

Dentro de la vida universitaria existen circunstancias tanto externas como internas, que implican el rol cada vez más importante del profesor en su calidad de tutor.

Cabe decir que la globalización es el resultado y consecuencia de la sociedad del conocimiento y la revolución tecnológica en el campo de las tecnologías de la información (TIC).

El perfil del estudiante universitario ha cambiado drásticamente debido a la masificación del alumnado; además, hay una reducción de los estudiantes solo dedicados a sus estudios.

La tutoría podemos definirla como:

- Un proceso que se da entre el profesor tutor y el alumno tutoreado.
- La finalidad que se persigue es lograr que el alumno se integre en el ámbito universitario, para mejorar su rendimiento y su desarrollo personal.
- Este es un proceso continuo que ayude al alumno durante toda su carrera y que, también, trascienda una vez salido de la universidad hasta su incorporación en el ámbito laboral.
- Este proceso tiene muchas dimensiones, dentro de las cuales señalaremos: la dimensión intelectual cognitiva, la dimensión afectiva emotiva, la dimensión social y la dimensión profesional.

CONCLUSIONES

La sociedad actual ha evolucionado rápidamente en los últimos 50 años, encontrándonos en la sociedad del conocimiento, sociedad globalizada. Este cambio se debe a los avances logrados en Ciencia yTecnología; y en sus componentes principales: investigación y desarrollo.

Las universidades deben elaborar un plan estratégico de corto, mediano y largo plazo, donde el nivel de excelencia esté asegurado.

Para alcanzar un nivel de excelencia se deben definir los conceptos de perfil profesional, competencias y diseño curricular.

Los profesionales que egresan de las universidades deben ser conscientes que su aprendizaje no depende del tiempo de permanencia en la universidad, sino que el aprendizaje es durante toda la vida.

REFERENCIAS

[1] WIENER, Norbert. *Cibernética y sociedad (The Human Use of Human Beings: Cybernetics and Society)* [CYS]. Buenos Aires: Editorial Sudamericana, 1969.

[2] MACHLUP, Fritz. *The Production and Distribution of Knowledge in the United States* [TPADOKIUSA]. Princeton: Princeton University Press, 1973.

[3] MASUDA, Yoneji. "Computopía versus estado automatizado, en VV. AA. *Problemas en torno a un cambio de civilización* [CVEA]. Barcelona: El Laberinto, 1998.

[4] TOURAINE, Alain. *La societé post-industrielle* [LSPI]. París: Editions Denoël, 1969.

[5] BELL, Daniel. *El advenimiento de la sociedad postindustrial* [ASPI]". Madrid: Alianza Editorial, 1976.

[6] PORAT, Marc. *The information economic definitions and mesaurement* [TIEDM]. Washington: U.S. Departament of Commerce, 1977.

[7] NORA, Simon & MINC, Alain. *La informatización de la sociedad* [LIDLS]. México D.F.: Fondo de Cultura Económica. 1980

[8] NAISBITT, Jhon.cMegatrends [M]. New York: Warner Books Inc, 1982.

[9] TOFFLER, Alvin. *La tercera ola* [LTO]. Barcelona: Plaza & Janes,1980.

[10] BRZEZINSKI, Zbigniew. *La era recnotrónica* [LET]. Buenos Aires: PAIDOS, 1973

[11] MASUDA, Yoneji. *The Information Society as Post-Industrial Society* [TISAPIS]. Maryland: World Feature Society, 1981.

[12] CASTELLS, Manuel. *La era de la información: economía, sociedad y cultura. Volumen I La sociedad red* [LEDLAIESCLASR]. Madrid: Alianza Editorial, 1997.

[13] DRUCKER, Peter F. *La sociedad poscapitalista* [LSPC].Buenos Aires: Editorial Sudamericana, 1993.

[14] SAKAIYA, Taichi. *Historia del futuro: la sociedad del conocimiento* [HDFLSDC]. Santiago de Chile: Editorial Andrés Bello, 1994.

[15] TERCEIRO, José B. *Sociedad Digital Del Homo Sapiens al Homo Digitalis* [SDDHSAHD].Madrid: Editorial Alianza Editorial, 1996.

[16] CREDÉ, Andreas & MANSELL, Robin. *Las sociedades de conocimiento… en síntesis Tecnología de la información para un desarrollo sustentable* [LSDCTIDS]. Ottawa: Editorial Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo, 1998.

[17] KORTEN, David. *El mundo post empresarial* [EMPE]. Barcelona: Editorial Granica, 2000.

[18] UNESCO. *Hacia las sociedades del conocimiento* [HLSDC]". París: Editorial UNESCO, 2005,

[19] WEIZSÄCKER, C. F. von. *La importancia de la ciencia* [LIDLC]. Barcelona: Editorial Labor, 1968.

[20] SERVAN SCHREIBER, Jean Jacques. *El Desafío Americano* [EDA]. Barcelona: Editorial laza & Janes, 1969.

[21] HILL, Charles W. & JONES, Gareth R. *Administración estratégica Un enfoque integrado* [AEUEI]. Santa Fe de Bogotá: Editorial Mc Graw Hill, 1996.

[22] KAPLAN, Robert S. & NORTON, David P. *El cuadro de mando integral The Balanced Scorecard* [ECDMITBS].Barcelona: Editorial Gestión 2000, 1997.

[23] JACKSON Jr., Harry K. & FRIGON, Normand L. *Logrando la ventaja competitiva Una guía hacia la calidad de clase mundial* [LLVC]". Naucalpán de Juarez: Editorial Prentice-Hall Hispanoamericana, 1998.

[24] SERNA GÓMEZ, Humberto. *Gerencia estratégica* [GE]. Bogotá: Editorial 3R Panamericana Editorial, 2003.

[25] DAVID, Fred R. *Conceptos de administración estratégica* [CDAE]. Naucalpán de Juarez: Editorial: Pearson Educación, 2008.

[26] PORTER, Michael E. *Estrategia Competitiva Técnicas para el análisis de las sectores industriales y de la competencia* [EC]. México: Editorial CECSA, 1987

[27] GENERALITAT VALENCIANA. *Perfil Profesional* [PP]". Valencia: Editorial Generalitat Valenciana. (s/f).

[28] http://www.redlabora.net/descargar-definicion-del-perfil-profesional-90.html. (s/f)

[29] http://www.cacei.org/manuallic/glosario.doc. (s/f)

[30] UNIVERSIDAD DE PALERMO. *Jornadas de Reflexión Académica en Diseño y Comunicación* [JDRAEDYC]". Buenos Aires: Editorial Universidad de Palermo, 2005.

[31] MORENO OLIVER, Verónica. *Marco metodológico para la definición de un perfil profesional en educación superior* [MMDPPES]. Barcelona: Editorial Unidad de Soporte a la Calidad e Innovación Docente Escuela Superior Politécnica Universidad Pompeu Fabra, 2009.

[32] COROMINAS, Joan. *Breve diccionario etimológico de la Lengua Castellana* [BDEDLC], Madrid: Editorial Gredos, 1967.

[33] FAURE, Edgar et. al. *Aprender a ser* [AAS]. Madrid: Editorial Alianza Universidad UNESCO, 1973.

[34] DELORS, Jacques et. al. *La Educación encierra un tesoro* [LEEUT]". París – Francia. Editorial: UNESCO, 1996

[35] "*Declaración de la Sorbona*" [DS]. París, 25 de mayo de 1998

[36] *"El espacio europeo de la enseñanza Superior* [EEES]". Bolonia,19 de Junio, de 1999.

[37] BLOOM, Benjamin. *Taxonomy of Educational Objectives: The Classification of Educational Goals* [TOEOTCOEG].New York: Editorial David McKay Company, Inc. 1956.

[38] ANDERSON, L. W. & KRATHWOHL D. *A Taxonomy for Learning, Teaching and Assessing: a Revision of Bloom's Taxonomy of Educational Objectives* [ATFLTAA]. New York: Editorial Longman, 2001.

[39] CHURCHES, Andrew. *Welcome to the 21st Century Retrieved* En http://edorigami.wikispaces.com/21st+Century+Learners, 2008.

[40] MERGEL, Brenda. *Diseño instruccional y teoría del aprendizaje* [DITDA]. Saskatchewan: Programa de Comunicaciones y Tecnología Educacional de la Universidad de Saskatchewan, 1998.

[41] SPENDOLINI, Michael J. *Benchmarking* [B]. Bogotá: Editorial Norma, 1994

[42] MCKINNON K. R. & WALKER S.H. & DAVIS D. *Benchmarking A manual for Australian Universities* [BAMFAU].Canberra: Editorial Department of Education, Training and Youth Affairs, 2000.

[43] MINDREAU, Eduardo. *Sistema de Benchmarking de Competencias Nucleares en Universidades*. Tesis doctoral presentada en la Universidad Politécnica de Cataluña [SBCNU]: Barcelona, 2000.

[44] VALLE, Mauricio. *Base de comparación de mallas curriculares de carreras de ingeniería civil* [BDCDMCDCDIC].Valparaíso: Editorial Revista Iberoamericana de Educación OEI, 2005.

[45] CATALANO, Ana María et. al. *Competencia laboral diseño curricular basado en normas de competencia laboral conceptos y orientaciones metodológicas* [CLDC].Buenos Aires: Editorial BID, 2004.

[46] FUCHS, Rosa María. *Currículo universitario basado en competencias* [CUBC]. Lima: ppt Universidad del Pacífico.

[47] BERNAL, José Luis. *Diseño curricular enseñanza universitaria. Aspectos Básicos* [DCEU]. Zaragoza: Universidad de Zaragoza.

[48] CASANOVA, Marly. *Aprendizaje cooperativo en un contexto virtual universitario de comunicación asíncrona*. Tesis Doctoral presentada en la Universidad Autónoma de Barcelona [ACCVUCA]. Barcelona, 2008.

[49] BARKLEY, Elizabeth et. al. Técnicas de aprendizaje colaborativo [TDAC]. Madrid: Editorial: Ediciones Morata, 2007.

[50] ESCRIBANO, Alicia & DEL VALLE, Angela (coods.) *El aprendizaje basado en problemas* [EABEP]. Madrid, 2008.

[51] DUTCH, Barbara et. al. *El Poder del Aprendizaje basado en problemas. Una guía práctica para la enseñanza universitaria* [EPDABEP]. Lima: Fondo Editorial de la PUCP, 2006.

[52] PASTOR DE ABRAM, Ana. ABP. Experiencias y resultados. Tres años de aprendizaje basado en problemas en la Pontificia Universidad Católica del Perú [ABPEYR]. Lima: Fondo Editorial de la PUCP, 2007.

ACERCA DEL AUTOR

Ingeniero Mecánico electricista por la Universidad Nacional de Ingeniería. Doctor en Ciencias Físicas por la Universidad Paul Sabatier de Toulose (Francia) y Magíster en Administración de Empresas por la Universidad del Pacífico.

Ha sido Decano de la Facultad de Ingeniería de Sistemas de la Universidad de Lima y miembro de los Consejos Directivos de:

- Instituto Científico y Tecnológico Minero (INCITEMI).
- Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET).
- Instituto de Investigación y Capacitación en Telecomunicaciones (INICTEL).
- Instituto Geofísico del Perú (IGP)

Ha sido Directo Técnico del Instituto Geofísico del Perú (IGP).

Es Presidente de la Asociación Peruana para el Avance de la Ciencia (APAC).

Actualmente trabaja para el departamento de Electrotecnia Industrial de Tecsup en Lima.

Original recibido: 29 de octubre de 2010.
Aceptado para publicación: 1 de diciembre de 2010.

Mitigación del riesgo eléctrico por análisis de Arc Flash

Mitigation of the electric risk by Arc Flash analysis

César Chilet, *Tecsup*

Resumen

Uno de los riesgos para un electricista que trabaja en mantenimiento son las quemaduras provocadas por radiación de calor, los que se originan por un arco eléctrico.

Para el presente estudio se han usado métodos para reducir el calor liberado por el arco eléctrico durante el cortocircuito, con la finalidad de mitigar el riesgo que provocan las instalaciones eléctricas energizadas en media y baja tensión a las personas expuestas durante una falla. Para el desarrollo del análisis empleamos la configuración real de una planta industrial donde se desarrolló este trabajo.

Inicialmente se hace referencia a conceptos y teorías relacionadas, con la finalidad de mostrar a los profesionales que se inician en el tema, la importancia de los estudios de Arc Flash en una planta industrial.

Abstract

One of the risk for an electrician who works in maintenance, are burns caused by heat radiation, originated by an electrical arc.

For this study we used methods to reduce the heat released by the arc during the short-circuit in order to mitigate the risk that produce when electrical installations in medium and low voltage to people to be exposed during a fault. To develop the analysis we use the actual configuration of an industrial plant where this work was developed.

Initially we do prefer to concepts and related theory, in order to show professionals that ones begin on the theme, the importance of Arc Flash studies in an industrial plant.

Palabras clave

Arc Flash, riesgo eléctrico, NFPA 70E, Std IEEE 1584.

Key Words

Arc Flash, Electrical risk, NFPA 70E, Std IEEE 1584.

INTRODUCCIÓN

Existen instituciones en Europa, Estados Unidos y Canadá que han desarrollado investigaciones sobre el nivel de riesgo originado por el arco eléctrico.

Las entidades de seguridad en el trabajo, como OSHA y NFPA, señalan que se deben de conocer los riesgos por arco eléctrico, determinar la energía liberada por el arco eléctrico y seleccionar el equipo de protección personal (EPP), uno de los requisitos de seguridad eléctrica que está sujeto a fiscalización.

Entre los métodos más empleados en la protección contra arco voltaico podemos citar los siguientes: uso de ropa especial para los operadores, empleo de cubículos más resistentes y uso de relés de protección, con eficiencia mejorada por la instalación de dispositivos detectores de arco.

FUNDAMENTOS

Fenómeno de arco voltaico

El arco voltaico en un sistema eléctrico puede ser definido como el flujo de corriente eléctrica a través del aire entre dos conductores activos de fase a fase o entre fase y tierra, producto de la ruptura de la aislación. La causa puede ser:

- Polvo e impurezas acumuladas en los aisladores y equipamientos.
- Vapor de agua/humedades presentes en el interior de los conjuntos de maniobra.
- Corrosión.

- Descargas parciales/reducción de la aislación.
- Contacto accidental con parte activas.
- Olvido o caídas de herramientas en las barras.
- Descargas debido a ionización del aire caliente (falso contacto).
- Descargas debido a sobretensiones transitorias.
- Entrada de animales en los tableros de maniobra.
- Defecto de fabricación de componentes.
- Diseño o montaje inadecuado.
- Mantenimiento deficiente.
- Maniobras indebidas, como la apertura en carga de seccionadores no destinados a estas maniobras.
- Mediciones y levantamientos de datos en circuitos energizados.
- Inserción y extracción de interruptores con algún tipo de inconveniente mecánico.
- Incumplimiento de los procedimientos de seguridad, como la no utilización de detectores de tensión, realización de puentes en los sistemas de comando, anulación de enclavamientos, entre otros.
- Reemplazo de un fusible, contactor o interruptor automático en un circuito energizado, o en cortocircuito.

Podemos ver que por la gran diversidad de factores técnicos y humanos involucrados, evitar la formación de arcos eléctricos es prácticamente imposible con la tecnología actual.

La velocidad del flujo es de aproximadamente 100 (m/s) y posee una temperatura tan alta que puede fundir metales y liberar gases tóxicos.

Estudios demuestran que si un arco dura más de 100 ms las personas están expuestas a riesgos de quemaduras graves; si el arco dura más de 500 ms puede ocurrir una explosión que cause destrucción total de equipamientos y muerte de personas.

De acuerdo con las estadísticas de la Organización Internacional del Trabajo, cada año se presentan en promedio 914 accidentes relacionados con actividades que involucran riesgos eléctricos; de este porcentaje de accidentes, un 30% resultan fatales. Este tipo de accidentes involucra adicionalmente al daño por corriente, accidentes conexos como caídas desde alturas considerables y su consecuente politraumatismo [1].

Estudios realizados en EE.UU. muestran que el 50% de las personas enviadas a las unidades de tratamiento de quemaduras poseen lesiones debido a la ocurrencia de arco voltaico y que una o dos entre cinco personas no sobrevive a las consecuencias de esas lesiones [2].

Efectos del arco eléctrico

A continuación enumeramos los principales riesgos y consecuencias para los seres humanos de estar expuestos al arco eléctrico:

- Posibilidad de pérdida completa o parcial de la visión, por efectos de los rayos infrarrojos y ultravioletas originados por el arco.
- Probabilidad de pérdida de la audición parcial o total debido al ruido provocado por la formación del arco, que puede alcanzar los 160 db.
- Elevada probabilidad de quemaduras de tercer grado y muerte debido a las consecuencias de las mismas.
- Posibilidad de asfixia por los humos tóxicos generados por la formación del arco.
- Posibilidad de quemadura de los pulmones y vías respiratorias por los gases calientes.
- Probabilidad de imposibilidad a trabajar, cuando hay pérdidas de los miembros y de la visión.
- Grandes gastos en la recuperación de las quemaduras de tercer grado, o indemnizaciones debido a muerte o invalidez para el trabajo.

Algunas definiciones importantes de arco eléctrico y aspectos asociados pueden encontrarse en la Norma "IEEE 1584-2002 IEEE Guide for Performing Arc Flash Hazard Calculations". Definiciones similares son encontradas en la Norma NFPA 70E: "Standard for Electrical Safety in the Workplace".

Cálculo de parámetros de arco eléctrico.

Para el cálculo de la energía incidente y de la distancia de seguridad para el operador ante un arco eléctrico fueron desarrolladas las siguientes relaciones matemáticas:

- Ralph Lee desarrolló ecuaciones generales utilizables para todos los niveles de tensión; si bien no utilizo la corriente de arco.

- La IEEE Std 1584 y la NFPA 70E perfeccionaron las ecuaciones a través de pruebas, introduciendo el cálculo de la corriente de arco, y formularon las ecuaciones que son muy empleadas para los niveles de baja tensión (BT) y media tensión (MT) hasta 15 kV.

Propuestas de solución para la reducción de la energía y mitigación de sus posibles efectos.

Un estudio de evaluación de los riesgos asociados a un arco eléctrico en los diversos puntos de un sistema eléctrico irá, muy probablemente, a mostrar puntos con altos niveles de energía incidente. En muchos casos, este valor puede sobrepasar los 40 cal/cm^2.

Para seleccionar la tecnología complementaria a la filosofía de seguridad, en los casos de conjuntos de maniobra y control de potencia, es cada vez más determinante en el proceso de proteger a la vida humana y preservar los bienes materiales asociados a la instalación.

- Empleo de celdas (conjunto maniobra y control) resistentes a los efectos del arco interno del tipo Metal Clad.

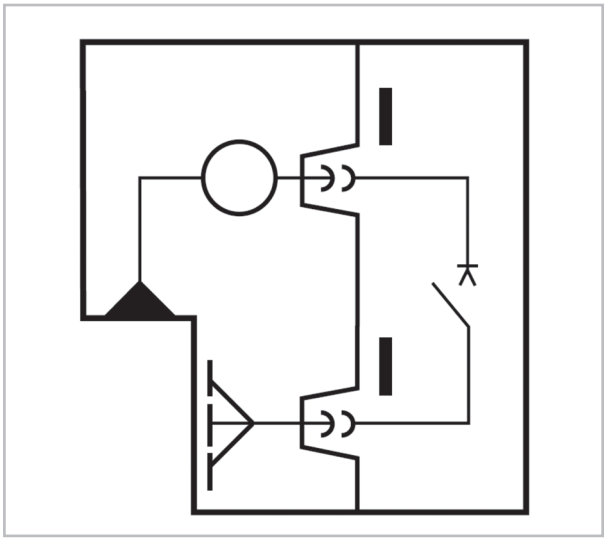


Figura 1. Celda metálica de tres compartimientos Metal Clad.

- Empleo de celdas con limitación de arco eléctrico.
  - Separación de compartimientos.
  - Rápida detección y desconexión de la falla.
- Empleo de dispositivos removibles y extraíbles.
- Uso de barreras y dispositivos remotos.
- Reducción de los valores de corriente de cortocircuito y de los tiempos de interrupción de los dispositivos de protección.
  - Empleo de reactores limitadores de corriente.
  - Resistencias de puesta a tierra en el neutro.
  - Empleo de interruptores y fusibles limitadores de corriente.
  - Modificación de la configuración de la red.
  - Reducción de los tiempos de operación de los dispositivos de protección.
  - Modificación temporal de los ajustes de tiempo, corriente y característica de operación de los dispositivos de protección.

Figura 2. Fusible limitador de media tensión - ABB.

- Empleo de tecnologías de mantenimiento predictivo en las instalaciones de maniobra y control de potencia.

- Sistematización de las prácticas y filosofía de instalación y protocolos de pruebas en la recepción de las instalaciones eléctricas.

APLICACIÓN

Se han tomado los datos de una instalación existente, cuya configuración contempla, dos subestaciones de transformación en 10 kV donde la potencia de cortocircuito trifásica es de 300 MVA en el punto de suministro de la empresa concesionaria, distante 40m, mediante cable NKY subterráneo.

En la subestación principal N.° 1 se cuenta con: una celda de llegada, dos celdas de transformación y una celda de derivación.

En la celda de llegada se cuenta con un interruptor automático con corte en vacíoc cuyo relé de protección numérico con unidades de sobrecorriente de fase y fase a tierra.

Tanto las celdas de transformación, como la celda de derivación, están equipadas con fusibles limitadores de media tensión.

La subestación N.º 2 cuenta con tres celdas: una celda de llegada y dos celdas de transformación.

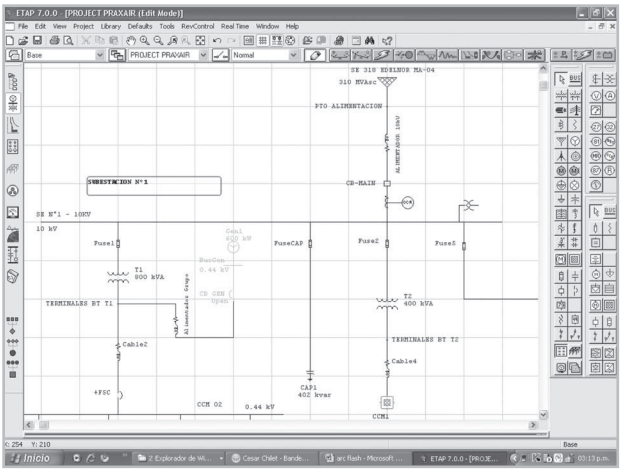


Figura 3. Diagrama unifilar de la SE N°1.

PROCEDIMIENTO

Para el cálculo del riesgo eléctrico, se ha empleado el software ETAP, empleando la norma IEEE 1584.

RESULTADOS

La categoría de riesgo eléctrico en la subestación N°1 es la categoría 3.

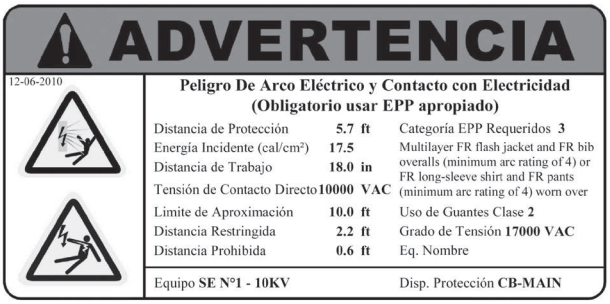

ADVERTENCIA
12-06-2010
Peligro De Arco Eléctrico y Contacto con Electricidad
(Obligatorio usar EPP apropiado)
Distancia de Protección 5.7 ft
Energía Incidente (cal/cm²) 17.5
Distancia de Trabajo 18.0 in
Tensión de Contacto Directo 10000 VAC
Limite de Aproximación 10.0 ft
Distancia Restringida 2.2 ft
Distancia Prohibida 0.6 ft
Categoría EPP Requeridos 3
Multilayer FR flash jacket and FR bib overalls (minimum arc rating of 4) or FR long-sleeve shirt and FR pants (minimum arc rating of 4) worn over
Uso de Guantes Clase 2
Grado de Tensión 17000 VAC
Eq. Nombre
Equipo SE N°1 - 10KV
Disp. Protección CB-MAIN

Figura 4. Etiqueta para SE N°1-10 kV

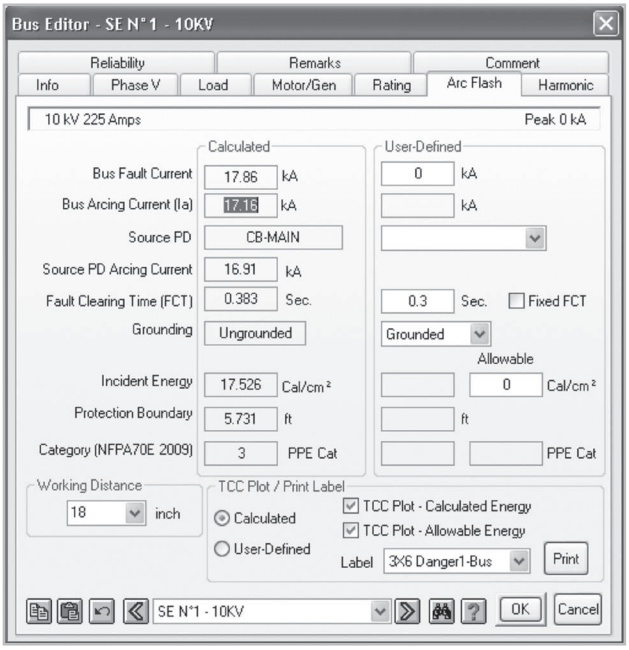


Figura 5. Resultados de Arc Flash de La barra de 10 kV – SE N°1.

Podemos apreciar que el tiempo total de aclaramiento de la falla (FTC) es de 383 ms.

De los resultados obtenidos en la subestación N°2, podemos apreciar que la limitación dada por el fusible en la celda de llegada reduce el nivel de riesgo eléctrico, donde el tiempo de aclaramiento de la falla es de 10 ms.

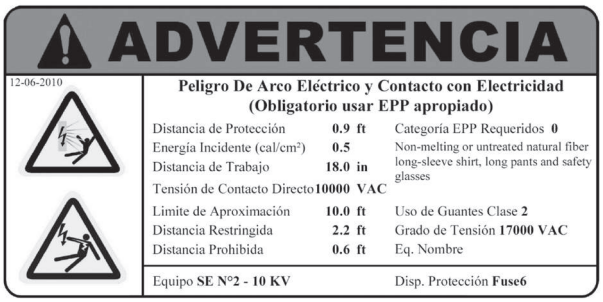

ADVERTENCIA
12-06-2010
Peligro De Arco Eléctrico y Contacto con Electricidad
(Obligatorio usar EPP apropiado)
Distancia de Protección 0.9 ft
Energía Incidente (cal/cm²) 0.5
Distancia de Trabajo 18.0 in
Tensión de Contacto Directo 10000 VAC
Limite de Aproximación 10.0 ft
Distancia Restringida 2.2 ft
Distancia Prohibida 0.6 ft
Categoría EPP Requeridos 0
Non-melting or untreated natural fiber long-sleeve shirt, long pants and safety glasses
Uso de Guantes Clase 2
Grado de Tensión 17000 VAC
Eq. Nombre
Equipo SE N°2 - 10 KV
Disp. Protección Fuse6

Figura 6. Etiqueta para SE N°2- 10kV.

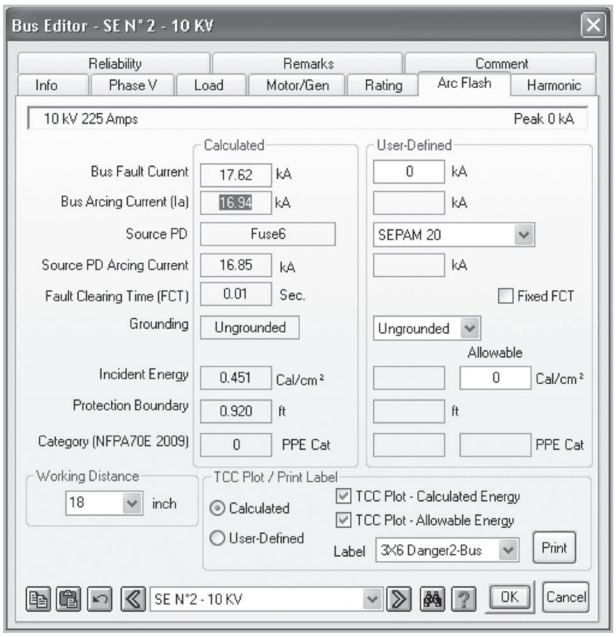


Figura 7. Resultados de Arc Flash de La barra de 10 kV – SE N°2.

Sin embargo, en la misma subestación N°2, a la salida del transformador T3, se tiene un interruptor que no posee capacidad de regulación, tanto en corriente como en tiempo, por lo que el riesgo eléctrico en la barra de baja tensión es elevada y requiere que se cambie por uno que tenga capacidad de regulación (según IEC de categoría B) En la figura 9, podemos apreciar que categoría de riesgo eléctrico excede los niveles máximos. En la Figura 10, notamos que el tiempo total de aclaramiento es de 11,22 s, valor que debe ser corregido al instalar un interruptor con capacidad de regulación en su circuito de disparo.

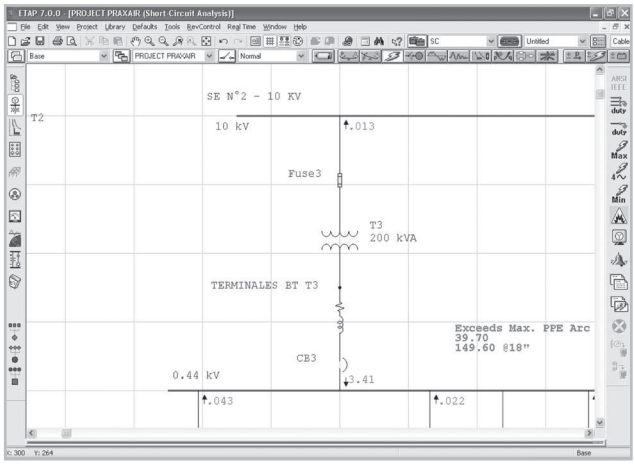


Figura 8. Diagrama unifilar SE N°2-440V.

ADVERTENCIA
12-06-2010
Peligro De Arco Eléctrico y Contacto con Electricidad
(Obligatorio usar EPP apropiado)
Distancia de Protección 39.7 ft
Energía Incidente (cal/cm²) 149.6
Distancia de Trabajo 18.0 in
Tensión de Contacto Directo 440 VAC
Limite de Aproximación 10.0 ft
Distancia Restringida 1.0 ft
Distancia Prohibida 0.1 ft
Excede el límite máximo del EPP
Uso de Guantes Clase 00
Grado de Tensión 500 VAC
Eq. Nombre
Equipo BARRA 440V SE N°2
Disp. Protección CB3

Figura 9. Etiqueta para tablero de 440V N°2.

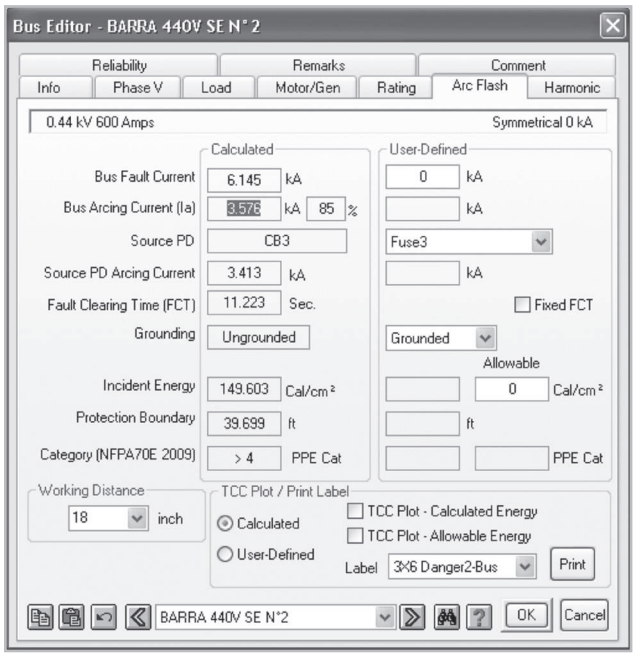


Figura 10. Resultados de Arc Flash de La barra de 10 kV – SE N°2.

CONCLUSIONES

La seguridad, asociada a compartimientos de maniobra y control de potencia, tanto en media como en baja tensión, es una actividad que se inicia en el diseño y que se prolonga por toda la vida útil de la instalación eléctrica:

- El diseño desarrolla un papel importante en la seguridad, que debe cumplir toda instalación eléctrica. Por ejemplo, debe definir el tipo de aterramiento a emplear.

- El empleo de tableros y celdas con capacidades de arco interno o Arc Flash, reducen el nivel de riesgo eléctrico independientemente de su costo, ya que la salud de la persona está por encima de costo alguno.

- Actualizar los estudios de ingeniería como: Flujo de carga, Análisis de cortocircuitos, coordinación de la protección y Arc Flash en la planta, cada vez que se tenga ampliaciones y/o modificaciones en las instalaciones eléctricas, esto permitirá tener un mejor panorama del nivel de riesgo eléctrico y el empleo del equipo de protección personal adecuado.

- Instalaciones eléctricas correctamente mantenidas conservan los niveles de seguridad eléctrica.

- El empleo de dispositivos limitadores reduce sustancialmente los niveles de corriente de cortocircuito presunta.

- Configuraciones en lazo cerrado y circuitos en paralelo elevan el nivel de cortocircuitos.

- La reducción en los tiempos de actuación de las protecciones, reducen el nivel de energía incidente, pero no se debe descuidar la selectividad que deben conservar las protecciones eléctricas.

REFERENCIAS

[1] Correa Arango, Adriana. MD Universidad Pontificia Bolivariana Coord. Área de urgencias, Emergencias y Desastres Escuela Ciencias de la Salud .

[2] "The Dangers of Arc-Flash Incidents *Maintenance Technology*, Febrary de 2004, disponible en: http://mt-online.com/article/0204arcflash.

ACERCA DEL AUTOR

Ingeniero Electricista colegiado, egresado de la Universidad Nacional de Ingeniería. Actualmente está encargado del laboratorio de sistemas eléctricos de potencia de Tecsup Lima.

Es autor de artículos técnicos y publicaciones en Protección de Sistemas eléctricos de Potencia. Recibió cursos en Ingeniería Eléctrica y Control Automático en la empresa ABB-Suecia; Protocolo IEC 61850 en General Electric–España. Expositor de seminarios a nivel nacional e internacional. Desarrolla trabajos de consultoría a empresas del sector. Desarrolla docencia en el Instituto Superior Tecnológico Tecsup Lima.

Original recibido: 8 de diciembre de 2010.
Aceptado para publicación: 13 de diciembre de 2010.

Modeling the impact of the multiframe transmission on quality of IP telephony service

Modelo del impacto de la transmisión multitrama en la calidad de servicio de telefonía IP

Raymond A. Hansen, *Purdue University*; Martín Soto, *Tecsup*

Resumen

En este artículo, identificamos algunas degradaciones en las comunicaciones de Telefonía IP y describimos los niveles objetivos de la calidad de voz. Proponemos un modelo para obtener el número óptimo de tramas de voz codificadas sobre la zona de carga del protocolo de tiempo real (RTP), manteniendo un nivel mínimo de calidad de voz.

Identificamos la influencia de este modelo sobre el modelo E ampliado, para analizar su impacto sobre la calidad de servicio caracterizado por la Medida Media de Opinión (MOS).

Finalmente, implementamos un escenario de VoIP basado en Asterisk para probar el efecto de la transmisión múltiple de paquetes VoIP sobre la calidad de las comunicaciones, utilizando el Analizador de Llamada Hammer.

Abstract

In this paper, we identify some impairs in IP Telephony communications and we describe the target levels of voice quality. We propose a model to obtain the optimal number of encoded voice frames in a Real-Time Transport Protocol (RTP) payload while maintaining a minimum level of voice quality.

We identify the influence of this model on an extended E-model to analyze its impact on the service quality characterized for Mean Opinion Score (MOS).

Finally, we implement an Asterisk based VoIP scenario to test the effect of multiple compressed VoIP packet transmission on quality of the communications, using Hammer Call Analyzer.

Palabras clave

Telefonía IP, calidad de servicio, e-modelo, Asterisk, cola.

Key words

IP Telephony, quality of service, e-model, Asterisk, queuing.

INTRODUCTION

Delay, jitter and packet loss are the three primary impairs in the quality of service of a VoIP network.

VoIP packets traversing an IP network can be dropped for a variety of reasons, ranging from the physical layer to the IP layer. The impact of lost packets on a voice call is depend upon the number and pattern of lost packets. The loss of just one packet will most likely be unperceived by the caller, while multiple, consecutive packet losses will cause the caller to miss noticeable portions of the voice from the caller on the other end. Thus, for example, a 5% packet loss during a call is considered to be unacceptable.

After packet loss, delay is the second most disruptive impairs in VoIP networks. The effects of delay to the caller generally appear as echo or talker overlap. In [1], the provided guidelines for call quality that characterize delay state that less than 150 ms of delay in one direction is acceptable, 150 – 400 ms is acceptable but not optimal, and greater than 400 ms of delay is unacceptable. For this paper, we have utilized a threshold of 200 ms as the boundary of acceptable levels of delay.

These sources of delay can be broken down into seven categories, some of which have constant, known delay and some of which have variable, time dependent delays: CODEC/Algorithmic Delay, packetization delay, serialization delay, propagation delay, switching delay, queuing delay, and jitter buffer delay.

Jitter is the delay variation of packet arrival between consecutive packets. It results in the clumping and gaps of the incoming voice stream. The generalized mechanism to minimize jitter is to use a buffer that will hold all incoming packets for a period of time so that the slowest packets arrive in time to be played in

the correct sequence. The jitter buffer will add to the overall delay of the network and so once a jitter exceeds a certain level, the jitter buffer will begin to impair the call through excessive delay. Adaptive jitter buffers are usually employed in managed VoIP networks. These adaptive buffers increase in size only as needed when the jitter increases.

Managed adaptive buffers will intentionally drop packets in order to maintain minimal delay to facilitate an acceptable level of call performance. A tradeoff must be made between packet loss and jitter compensation and it must be weighed against the effects of R-factor and/or MOS score.

In this paper, our research includes the queuing modeling of VoIP packet transmission, the optimization of the number of VoIP packets carried on RTP protocol and the influence on MOS is determined. We use the Extended E-model proposed in [5] for analyzing the impact over voice quality. Finally, the IP Telephony simulation testbed is implemented based on Asterisk Communications Server for the corresponding tests.

FUNDAMENTALS

The work in [2] uses three test scenarios and shows the optimization of VoIP network by selecting parameters including voice coder, packet loss level and network utilization. The algorithm needs to be tested with more variables and more work needs to be done with the architecture of a proposed VoIP broker.

The paper [3] shows a VoIP LAN testbed and presents the results of experiments and it, analysis. It has estimated the QoS obtained by the end user and analyzed performance metrics. The voice quality measurement considers the extent of sources of degradation, whether they occur inside or outside the network, and determine the overall impact of quality as a measurement known as a Mean Opinion Score (MOS).

The paper [4] proposes an optimization method based on the E-Model for designing a VoIP network. The method used is based on selection of some VoIP network parameters such as voice coder, communication protocol, packet loss level, network utilization and resource allocation. It shows an analytic approach for achieving rating value (R) that represent the level of quality of service and makes some simplification and focus on delay and packet loss calculation to find an the R-value.

Research work in [5] investigates the effects of packet loss and delay jitter on speech quality in specific VoIP environments. It proposes the extended E-model to quantify these effects in order to analyze the voice quality degradation. In its simulation, codecs ITU-T G.723.1 and G.729 are used with random packet loss and Pareto distributed network delay.

From the papers above, we didn't find any dependence factors for quality of service that directly address the number of voice frames contained in the RTP payload.

As such, we present an analysis of the delay and packet loss parameters and their dependence on the number of voice frames carried in the RTP protocol and its influence in the quality of voice represented by the E-model.

METHODOLOGY

VoIP packet transmission

RTP provides end-to-end delivery services for data with real-time characteristics, such as interactive audio and video. Those services include payload type identification, sequence numbering, timestamping and delivery monitoring. Applications typically encapsulate RTP into UDP to make use of its multiplexing and checksum services; both protocols contribute with parts of the transport protocol functionality. This is the approach used here.

Note that RTP itself does not provide any mechanism to ensure timely delivery or provide other quality-of-service guarantees, but relies on lower-layer services to do so. It does not guarantee delivery or prevent out-of-order delivery, nor does it assume that the underlying network is reliable and delivers packets in sequence. The sequence numbers included in RTP allow the receiver to reconstruct the sender's packet sequence, but sequence numbers might also be used to determine the proper location of a packet, for example in video decoding, without necessarily decoding packets in sequence.

A codec (coder/decoder) converts from a sampled digital representation of an analog signal to a compressed digital bitstream, and another identical codec at the other end of the communication converts the digital bitstream back into an analog signal. In a VoIP system, the codec used is often referred to as the encoding method, or the payload type for the RTP packet. Codecs generally provide some compression capability to save network bandwidth. Some codecs also support silence suppression, where silence is not encoded or transmitted. Three primary factors to be optimized are the speed of the encoding/decoding operations (packetization delay), the quality and fidelity of sound, and the size of the resulting encoded data stream.

Table 1 shows the basic features of representative ITU standard codecs.

Table 1. VoIP ITU codec comparison

Codec	Algorithm	Rate (Kbps)	Packetization delay (ms)
G.723.1	Multi-rate	5,3 / 6,3	67,5
G.729	CS-ACELP	8	25
G.711	PCM	64	1

As shown in Figure 1, there are several components of delay in the IP Telephony communications. First, at the transmitter IP Phone (1), there are fixed delays as encoding, look-ahead, packetizing, buffering, and LAN serialization.

Second, at the originating LAN networks (2) there are fixed delays like UTP cable propagation, LAN switching, processing delay, and WAN serialization. Also, there is a variable delay as LAN queuing.

Third, at WAN networks (3) there are fixed delays as originating in the access loop propagation, WAN Core propagation, WAN switching, WAN processing, WAN Core serialization, WAN serialization, terminating the access loop propagation. Likewise, there is variable delay as queuing.

Fourth, at terminating LAN network (4) there are fixed delays: processing delay, LAN serialization, LAN switching, and UTP cable propagation. Also, there is a variable delay which is LAN queuing.

Finally, at receiver IP Phone (5), there are fixed delays in the dejitter buffer and decoding.

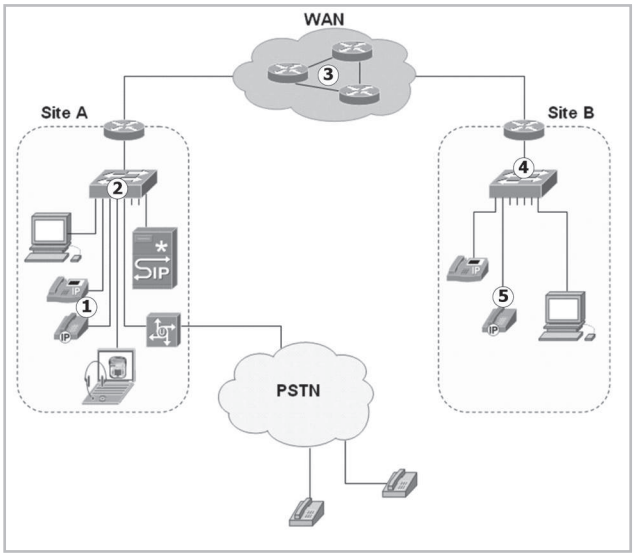


Figure. 1. Delay factors in IP Telephony

Characterizing queuing delay is usually done by statistical measures such as average queuing delay, variation of queuing delay and the probability of some specific value. Delay parameters have inherent trade-offs against voice quality, bandwidth requirement, end-to-end delay and packet loss.

Due to the additional of overhead from encapsulating protocols, the VoIP packet actually requires more bandwidth than is determined just by the bitrate at the exit of the codec. As means of reducing this total overhead, these voice packets can be compressed to optimize the bandwidth.

Nevertheless, collecting a number of compressed voice data bytes into the RTP payload causes an amount of fixed delay, which is proportional to the size of the voice packet. Also, it contributes to the use of network bandwidth and therefore to the packet's overall delay.

For this, it is important to relate the packetization process delay of voice data in RTP to the end-to-end delay, then to optimize the packetization delay to diminish the global delay.

Figure 2 shows a codec that generates *n* encoded and compressed voice data bits into an RTP payload at a rate of Vcodec.

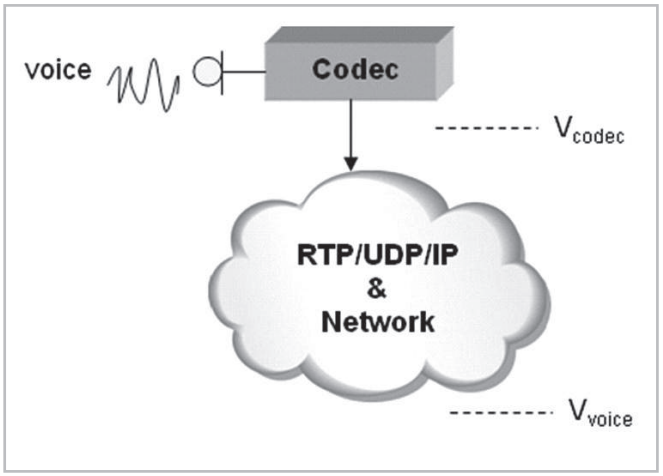


Figure. 2. Paquetization Process in IP Phone

If both the TCP/IP stack and network frame contributes with h overhead bits at the codec with voice data length Lcodec and voice data delay *T* codec, then voice bandwidth required for the network is expressed as:

$$V_{voice} = V_{codec}\left(\frac{h}{n.L_{codec}} + 1\right) \quad (1)$$

The end-to-end delay in the global VoIP system is the sum of all the factors of fixed and variable delay, including the packetization process delay, as shown in Figure 1.

If the Voice packets are accumulated in 20 ms periods in order to optimize the transport of voice traffic on a data network, the accumulation of 20 ms of voice traffic before transmission translates into a minimum of 20 ms of delay. If it is desirable to transmit fewer packets to reduce network congestion, say 40 ms packets instead of 20 ms packets, then this network traffic optimization translates directly into an increased delay impairment of at least 40 ms. Depending upon the total system delay, this may be acceptable, but the trade-off between decreased network traffic and increased packetization delay must be carefully weighed.

Queuing model

As a first approximation, to address the delay caused by queuing, the M/M/1 queuing model was used to establish variable delay on a link as a function of utilization and packet loss. Packet loss is assumed to be the point on the tail of the delay distribution where packets are simply dropped.

We consider a Poisson pattern of background traffic close to a voice stream across the link with bandwidth Vlink between sender and receiver codec. Thus, we have the following end-to-end delay:

$$T = \tau_{packet} + \tau_{M/M/1} \quad (2)$$

Where τ_{packet} is the packetization delay and $\tau_{M/M/1}$ is the queuing delay. It spans the buffer queuing time and service time. When voice traffic is transmitted, the current traffic load of the link ρ is increased by Vvoice/Vlink.

Also, the remaining time at buffer queue is expressed as:

$$\tau_{queue} = \frac{1}{\mu}\left[\frac{\rho}{1-\rho}\right] \quad (3)$$

It is assumed that all service time presents the following characteristic:

$$\tau_{service} = \frac{1}{\mu} = \frac{L_{link}}{V_{link}} \quad (4)$$

Where, Llink is the average packet length of background traffic. Therefore, from above equations the end-to-end delay will be:

$$T = n.T_{codec} + \frac{L_{link}}{(1-\rho)V_{link} - V_{voice}} \quad (5)$$

The number of compressed voice packets that allow the lowest end-to-end delay can be determined from the equation (5) as the following:

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0 \quad (6)$$

From here, this number is expressed as:

$$n = \frac{h + \sqrt{\frac{L_{link}}{V_{link}} * h}}{(1-\rho).T_{codec}.V_{link} - L_{codec}} \quad (7)$$

As can be seen, both packetization delay and current network load condition affect on end-to-end delay.

Influence on VoIP quality estimationmodels

The E-Model defined in the ITU-T Rec. G.107 [6] is an analytic model for the prediction of VoIP quality based on network impairment parameters such as packet loss and delay. It provides an objective method of assessing the transmission quality of a telephone connection.

The E-Model results in an R factor ranging from a best case of 100 to a worst case of 0. The R-factor uniquely determines the MOS.

The MOS provides a numerical indication of the perceived quality of received media after compression and/or transmission. It is expressed as a single number on a scale of 1 to 5, where 1 is the lowest perceived quality, and 5 is the highest perceived quality.

The Extended E-model [5] includes the effects of packet loss and delay variation or jitter on speech quality in VoIP applications. Thus, the factor R is defined as:

$$R = R_o - I_s - I_d - I_e - I_j + A + W \quad (8)$$

where R^o represents the effect of background and circuit noise, Is represents the impairments occurring simultaneously with the voice signal (quantization), I^d represents the impairments caused by delay, Ie represents the impairments caused by low bit rate voice coders and packet loss level, and Ij represents the impairment caused by jitter. The advantage factor A can be used for compensation when there are other advantages of access to the user, and W is the adjustment factor if a wideband codec is used.

Id must incorporate the effect of simultaneously transporting several compressed voice packets.

RESULTS

For the case where the data link presents 256 Kbps over Ethernet link, we found in Figure 3 the influence of traffic load over the number of compressed voice packets and delay for G.723.1 codec to 6.3 Kbps and Figure 4 for G.729 codec.

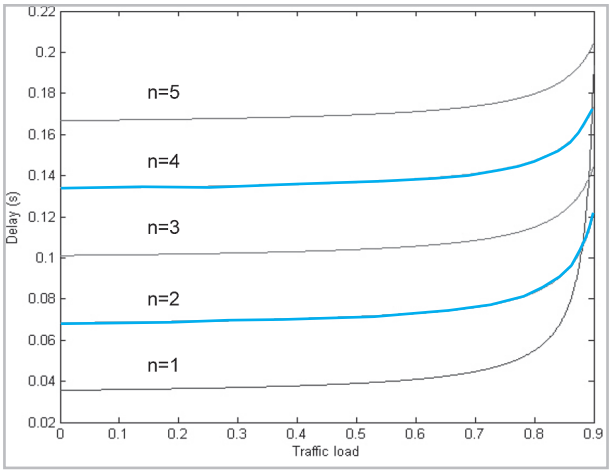


Figure 3. Delay vs. traffic

From the above Figure, the correlated influence of traffic load on delay is clear when n is increased delay also increases. It follows the logical understanding that an increase in the number of active voice frames in each RTP stream, the end-to-end delay for the system is increased.

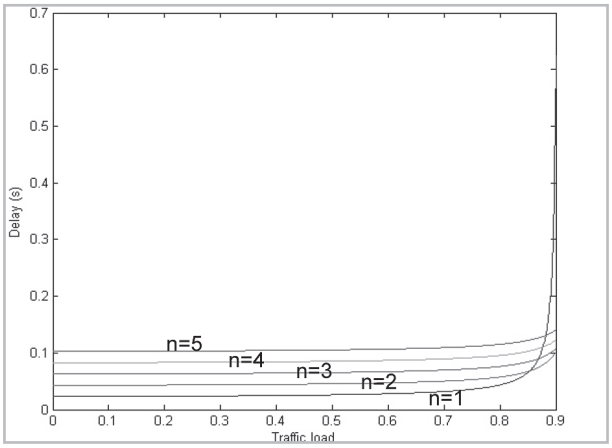


Figure 4. Effect of traffic load

Also, as Figure 5 shows, we implement an Asterisk based IP Telephony experimental scenario to test and to measure the delay and other parameters to estimate the R-factor and to obtain the MOS of IP Phones communications.

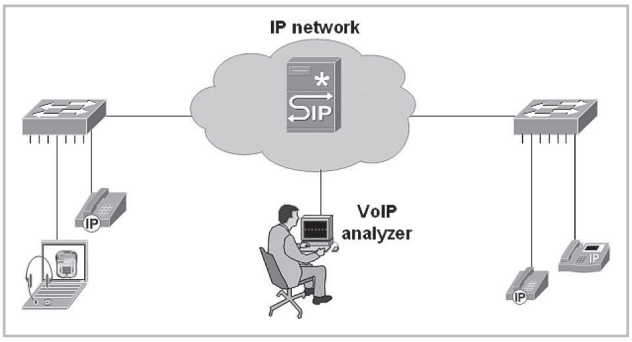


Figure 5. Testbed scenario

We used Hammer Call Analyzer to perform the measurements of the VoIP environment. In Figure 6, it shows the influence of end-to end delay over time against the R-factor. Also, there are the MOS mean values obtained. It shows the effects of voice frame size on the R-factor and MOS obtained from IP Telephony scenario operation.

Figure 7 shows the plot of the jitter throughout the time against G.711, G.729 and G.723.1 codecs. As demonstrated, this follows a probabilistic behavior.

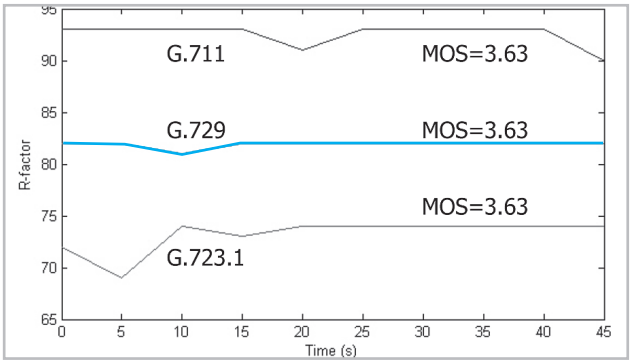


Figure 6. Variation of E-model R value

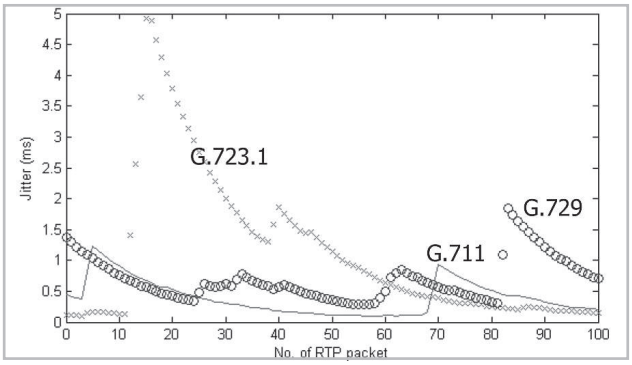


Figure 7. Jitter vs. No. of RTP Packet

CONCLUSIONS

- In this study, a VoIP queuing model is developed, where its effect on reducing the delay are due to an optimal number of packets.
- This model can be used with a given scenario of voice traffic to determine the QoS required by voice communication.
- The latest approximation on the queuing model can be M/G/1 with G as Pareto distribution to represent the self-similarity of background traffic.
- If we consider the measure of the QoS effect in receiving it could be a notification feedback to a transmitter codec to assign an optimal number of packet in RTP payload.

REFERENCES

[1] ITU-T Recommendation G.114, One way transmission time, May 2003.

[2] GARDNER, M.T., FROST, V. S. and PETR, D.W., *Using Optimization to Achieve Efficient Quality of Service in Voice over IP Networks, The 22nd Int*. Performance, Computing, and Communications Conference (IPCCC), Phoenix, Arizona, 2003.

[3] DIMOVA, R; GEORGIEV, G; STANCHEV, Z. Performance Analysis of QoS Parameters for Voice over IP Applications in a LAN Segment". Fourth International Conference Computer Science, Sofia, 2008.

[4] "Optimization Model for Achieving Efficient VoIP Networks". Proc. of the International Conference on Electrical Engineering and Informatics, June 17-19, 2007.

[5] DING, L. & GOUBRAN, R. *Speech quality prediction in VoIP using the extended E-model*. Proc. of IEEE GLOBECOM, 2003.

[6] ITU-T Recommendation G.107, The E-model, a computational model for use in transmission planning, Mar. 2005.

ABOUT THE AUTHORS

Raymond Hansen

Bachellor in Telecommunications & Networking Technology. Master in Technology: Network Engineering, IT Management. Assistant Professor of Computer and Information Systems Technology at Purdue University in West Lafayette, Indiana. In addition to his academic work, professor Hansen provides consulting services to engage corporations and local city & county governments in order to provide services through a wireless network engineering firm with projects ranging from integration of IP Video, VoIP, and other enterprise services over LANs, WANs, & WLANs to the implementation of wireless municipal & wide area networks (WWANs & WMANs) for both the corporate enterprise and municipalities.

Martín Soto

Electronic Engineer from Ricardo Palma University. Graduate Studies in Data Communication Networks. Master in Systems and Network Communications (UPM, Polytechnical University of Madrid). Doctoral Studies in Telecommunications (UPC, Barcelona Tech). Digium Certified Asterisk Professional (DCAP No. 1494). Telecommunications Master Teacher in UNMSM, Universidad Nacional de San Marcos (Perú) and System Master Teacher in UNI. Tecsup professor in the area of telecommunications. Business Advisor and Consultant.

Original recibido: 6 de diciembre de 2010.
Aceptado para publicación: 13 de diciembre de 2010.

Lima:
Av. Cascanueces 2221 Santa Anita.
Lima 43, Perú

Publicación Semestral
Tecsup se reserva todos los derechos legales de reproducción del contenido, sin embargo autoriza la reproducción total o parcial para fines didácticos, siempre y cuando se cite la fuente.

Instrucciones para los autores

La revista Investigación aplicada e innovación, I+i, es publicada semestralmente. El objetivo de la revista es contribuir al desarrollo y difusión de investigación y tecnología, apoyando al sector productivo en la mejora de sus procesos, eficiencia de sus procedimientos e incorporando nuevas técnicas para fortalecer su competitividad. Las áreas principales de su cobertura temática son: Automatización industrial, Electrotecnia, Electrónica, Tecnologías de la Información y Comunicaciones (TIC), Ensayo de materiales, Química y Metalúrgica, Educación, Mantenimiento, Tecnología Agrícola, Tecnología de la Producción, Tecnología Mecánica Eléctrica, Gestión y Seguridad e Higiene Ocupacional.

Va dirigida a los profesionales de los sectores productivos y académicos en las áreas de la cobertura temática.

Requisitos para la publicación de artículos:

1. Formato y envío del artículo

- El trabajo debe ser original, inédito y en idioma español o inglés.
- El artículo debe tener una extensión entre 7 y 14 páginas en Word.
- El interlineado será sencillo, fuente Tahoma, tamaño 11 puntos.
- Todos los márgenes son de 2,5 cm en tamaño de página A4.
- Envío por vía electrónica a investigacioneinnovacion@tecsup.edu.pe

2. Estructura del artículo

- Al comienzo del artículo se colocará el título de la investigación (en inglés y español), nombre y apellidos de los autores y su afiliación académica e institucional.
- A continuación aparecerá –en español e inglés un breve resumen del contenido del artículo y unas palabras clave con cuerpo de 9 puntos.
- El artículo debe dividirse en:
  - **Introducción:** Explicar el problema general; Definir el problema investigado; Definir los objetivos del estudio; Interesar al lector en conocer el resto del artículo.
  - **Fundamentos:** Presentar los antecedentes que fundamentan el estudio (revisión bibliográfica); Describir el estudio de la investigación incluyendo premisas y limitaciones.
  - **Metodología:** Explica cómo se llevó a la práctica el trabajo, justificando la elección de procedimientos y técnicas.
  - **Resultados:** Resumir la contribución del autor; Presentar la información pertinente a los objetivos del estudio en forma comprensible y coherente; Mencionar todos los hallazgos relevantes, incluso aquellos contrarios a la hipótesis.
  - **Conclusiones:** Inferir o deducir una verdad de otras que se admiten, demuestran o presupone; Responder a la(s) pregunta(s) de investigación planteadas en la introducción y a las interrogantes que condujeron a la realización de la investigación.
  - **Referencias:** Trabajar las referencias bajo el formato del American Psychological Association (APA)

3. Selección de artículos

- El procedimiento de selección de artículos para ser publicados se realiza mediante un sistema de arbitraje que consiste en la entrega del texto anónimo a dos miembros del consejo editorial, especialistas en el tema. Si ambos recomiendan su publicación, se acepta su dictamen y se comunica al autor; si no coinciden, el dictamen de otro miembro será definitivo.
- Una vez enviado el artículo, cumpliendo con todas las normas antedichas, el consejo de redacción corregirá una sola prueba, no siendo posible remitir posteriores modificaciones.
- Para contactar con usted, rogamos que adjunte su correo electrónico, correo postal, teléfono y fax.

Campus Arequipa
Urb. Monterrey Lote D-8 José Luis Bustamante y Rivero. Arequipa, Perú
T: (54)426610 - **F:** (54)426654
MAIL: principal@tecsup-aqp.edu.pe

Campus Lima
Av. Cascanueces 2221 Santa Anita. Lima 43, Perú
T: (51)317-3900 - **F:** (51-1)317-3901
MAIL: informes@tecsup.edu.pe

Campus Trujillo:
Via de Evitamiento s/n Victor Larco Herrera. Trujillo, Perú
T: (44)60-7800 - **F:** (44)60-7821
MAIL: informestrujillo@tecsup.edu.pe

www.tecsup.edu.pe

Instituto de Educación Superior Tecnológico Privado TECSUP N° 1 RM: N° 153-84-ED (17/02/1984) RD: N° 054-2005-ED (24/02/2005)

TECSUP